

FLÁVIO DE MIRANDA RIBEIRO

**Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil-
Usina de Itaipu: primeira aproximação.**

Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (PIPGE/ USP) para obtenção do Título de Mestre em Energia.

v.1- Corpo de texto.

São Paulo

2003

FLÁVIO DE MIRANDA RIBEIRO

**Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil-
Usina de Itaipu: primeira aproximação.**

Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (PIPGE/ USP) para obtenção do Título de Mestre em Energia.

Área de Concentração:
Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento.

Orientador:
Prof. Livre-Docente Gil Anderi da Silva
(Departamento de Engenharia Química-
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo)

v.1- Corpo de texto.

São Paulo

2003

Esta versão difere da tese ou dissertação depositada e aprovada na defesa, à qual foram incorporadas modificações sugeridas pela comissão examinadora, devidamente verificadas e aprovadas pelo orientador.

De acordo,

Orientador: Prof. Dr. Gil Anderi da Silva

FOLHA DE APROVAÇÃO

Flávio de Miranda Ribeiro

Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil-
Usina de Itaipu: primeira aproximação.

Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós Graduação
em Energia da Universidade de São Paulo (PIPGE/ USP) para
obtenção do Título de Mestre em Energia.

Área de Concentração: Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Gil Anderi da Silva, pelo constante incentivo, paciência, amizade, orientação muito além da acadêmica e por todos os ensinamentos- principalmente aqueles que se aprendem sem serem ensinados.

Ao pessoal da Itaipu Binacional, em especial à: Antônio Correia Ribas, Alexandre Machado e Hélio Teixeira, pelo apoio à visita técnica realizada; ao pessoal da Divisão de Obras Civas- Jandir Balvedi, Carlos Roberto Leonardo, Hugo Mescolin, Gilmar Fabro, Antônio Lima e Francilino Fernandes Netto, pelos dados fornecidos e imprescindível atenção prestada, e à João Carlos Zenhpennig e Luiz Dalmo Marena, pelo apoio em relação às emissões de gases de efeito estufa.

À Pre Consultants, em especial à Michel Oele, pela cessão da licença temporária do Sima Pro, sem a qual este trabalho não seria viável.

Aos docentes, colegas e funcionários do PIPGE/USP e IEE/ USP, pelo conhecimento compartilhado, apoio fornecido, eterna boa vontade, oportunidades proporcionadas e amizades conquistadas, e ao CNPq pela bolsa concedida.

Aos colegas do GP2, em especial Luiz Alexandre Kulay, Alexandre Yokote, Wady Facuri e Yuki Hamilton, pela troca de informações, experiências, dificuldades e sonhos.

À todos aqueles que me auxiliaram pessoalmente com suas opiniões, conselhos, informações técnicas e histórias pessoais, em especial a Francisco Andriolo, Francisco Cesari, Mauro Anastácio, prof. Kokei Uehara, prof. Vanderley John, prof. Yushiro Kihara, prof. Cyro Takano, Mauro Rodrigues, Mary Ann Curran, Cláudio Alonso, Oswaldo Lucon, João Wagner Alves, Renato Linke, Wanderley Costa, Maria Cristina Poli, Geraldo Schumann Cunha, Stale Navrud e Isac Roisenblatt.

Às empresas e institutos que gentilmente forneceram informações técnicas, a saber: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Atlas Copco, Camargo Corrêa, Hydro québec, Ingersoll- Rand, Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), Ministério das Minas e Energia (MME), O&K Mining GmbH, Sindicato Nacional das Industrias de Cimento (SNIC), Sotreq, Themag Engenharia, United States Environmental Protection Agency (EPA) e Voith- Siemens.

Aos amigos, familiares e à Tarsila, pelas horas de convívio subtraídas, e pelo conforto, carinho e compreensão da importância deste trabalho para mim.

À meus pais, a quem devo a formação moral, a inspiração, o caráter e a vida.

“Não quero faca nem queijo, quero fome”

Adélia Prado

RESUMO

RIBEIRO, F.M. **Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil- Usina de Itaipu: primeira aproximação**. 2003. 2v. Dissertação (mestrado)- Programa Interunidades de Pós- Graduação em Energia (EP-IF-FEA-IEE). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) tem se mostrado uma importante ferramenta de avaliação ambiental, devido à seu enfoque “sobre função”, que permite considerar o desempenho ambiental de produtos, procedimento cada vez mais requerido por diversos atores sociais.

Para que a ACV possa ser utilizada de modo amplo e confiável, faz-se necessário que se desenvolvam bases de dados regionalizadas, contendo Inventários de Ciclo de Vida (ICV) dos principais insumos usados pela sociedade- energia, matérias- primas, etc.

O presente trabalho faz parte de uma projeto conduzido pelo GP2- Grupo de Prevenção da Poluição, da Escola Politécnica/ USP, de disponibilização de bases brasileiras para ACV, sendo dedicado especificamente à geração de eletricidade.

Para permitir sua realização no âmbito de uma dissertação de mestrado, adotou-se como simplificação a geração de eletricidade na usina hidrelétrica de Itaipu, responsável em 2000 por 22,4% da eletricidade consumida no país.

Para construir o ICV realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o uso da ACV em hidrelétricas, estabelecendo recomendações gerais. A seguir, estudou-se Itaipu quanto à sua obra civil e consumo de insumos na construção e operação por 100 anos, obtendo ao final um ICV com os aspectos ambientais mais significativos em termos da energia gerada (MWh).

Neste contexto as fronteiras estabelecidas incluem: escavações e obras de terra; instalação e operação do canteiro de obras; transporte dos operários e de cimento, cinzas, aço estrutural e diesel para a obra; ciclo de vida do aço, cobre, cimento, diesel, óleos lubrificante e de transformador usados na barragem e equipamentos permanentes (considerando inclusive manutenção e substituição); e enchimento do reservatório.

Com a discussão dos resultados pode-se demonstrar, além da importância do uso de dados homogêneos, que o ICV é extremamente sensível ao horizonte de análise (na verdade à energia gerada), o que confirma que a construção é a principal origem dos aspectos ambientais significativos.

Outra conclusão é que cada hidrelétrica constitui um caso particular, não sendo possível atribuir valores típicos. No entanto, há indícios de que Itaipu, por seu alto fator de capacidade e potência instalada, possua um desempenho ambiental acima da média das hidrelétricas, principalmente no que se refere ao tempo de retorno da energia investida.

As estimativas indicam que os processos que mais contribuem aos aspectos ambientais de hidrelétricas sejam: enchimento do reservatório; ciclo de vida do cimento e aço, e operação das máquinas de construção. As etapas de transporte parecem não ser de relevância, ao contrário do consumo de aço nos equipamentos permanentes.

Em comparação com a geração termelétrica, as emissões atmosféricas e consumo de água do ciclo de vida de Itaipu se mostraram significativamente menores. No entanto há que se considerar que esta comparação se restringiu a estes aspectos.

Ao final, conclui-se que resultados mais precisos sobre aspectos e processos de maior prioridade dependem da condução da etapa de Avaliação de Impactos da ACV, e portanto não se deve utilizar os resultados desta análise de inventário como único critério para tomada de decisões em planejamento energético.

Palavras- Chave: Análise de Ciclo de vida. Gestão Ambiental. Geração hidrelétrica. Usina Itaipu.

ABSTRACT

The Life Cycle Assessment (LCA) has been proven to be an important environmental assessment tool, mainly due to its “focus on function”, which allows the consideration of the environmental performance of products, itself a proceeding that has been more and more requested by different social actors.

However, for LCA to be widely and trustfully used, the development of local data bases containing Life Cycle Inventories (LCI) of the most used inputs (energy, raw materials, etc.) is necessary,

The present thesis is part of a project conducted by GP2- Group of Pollution Prevention - Escola Politécnica/ USP, which aims to develop and make available a Brazilian LCA data base. Specifically, it focuses electricity generation.

In order to allow this project to be concluded in a masters degree context, it was adopted as a simplification the electricity generation in Itaipu Hydropower Plant, responsible for 22,4% of Brazilian consumption in 2000.

As a first step towards the elaboration of the LCI, a review on LCA use on hydropower plants was conducted, establishing general recommendations. On the following, Itaipu project was studied concerning its initial civil works and the materials consumption on construction and operation within a 100 year period, obtaining as a result a LCI with the most significant environmental burdens in terms of generated energy (MWh).

The system boundaries on this context includes: excavations and other earthen works; building site installation and operation; transportation of: workers, cement, ashes, structural steel and diesel; life cycle of steel, copper, cement, diesel, lubricant oil and transformer oil used on the dam and permanent equipment; (including maintenance and substitution); and reservoir filling.

The results demonstrate, besides the importance of data homogeneity, that the LCI is extremely sensitive to the considered lifetime, which confirms that the construction phase is the main source of environmental burdens.

Another important conclusion is that each hydropower plant is a particular case, and it is not possible to establish typical values for the environmental burdens. However there is an indication that Itaipu has a better environmental performance than other

plants, mainly on respect to the energy pay back period, due to its high capacity factor and installed power.

According to the estimates, the process which most contributes to the environmental burdens of hydropower plants life cycle are: reservoir filling; steel and cement life cycle; and operation of construction machines. Transport activities are of no relevance, however the steel consumption on permanent equipment is.

Compared to thermal power, hydropower life cycle air emissions and water consumption are shown to be significantly lower. This comparison indeed is restricted only to this burdens.

Finally, recommendations are presented, in the spirit of refining boundaries in the following studies, and the objectives attained are commented.

It should be highlighted that all hypothesis and calculations are located in the Annex volume, being just referenced on the main text.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.01: Estrutura das etapas da ACV (ABNT, 2001)	16
Figura 3.02: Cadeia de Conversão energética numa hidrelétrica.....	26
Figura 3.03: Desvio de rio em uma única fase(adaptado de NAKAZATO, 1988)....	34
Figura 3.04: Desvio do rio em duas fases (adaptado de NAKAZATO, 1988).....	34
Figura 3.05: A Cadeia Energética Genérica (GOLDEMBERG, 1998)	45
Figura 3.06- Fluxograma Vattenfall para ICV de usina hidrelétrica (BRÄNSTRÖM- NORBERG et al., 1999).	58
Figura 5.01: Fronteiras iniciais (simplificado a partir de BRÄNSTÖM-NORBERG et al., 1996).	79
Figura 5.02- Fronteiras do sistema de produto de Itaipu.	83
Figura 6.01- Distribuição da quantidade de valores da variação percentual dos aspectos ambientais para as diferenças entre os horizontes de análise avaliados.	113
Figura 6.02- Contribuição percentual de cada recurso energético em cada processo.	134
Figura 6.03- Contribuição percentual de cada processo em cada recurso energético.	135
Figura 6.04- Contribuição dos processos aos aspectos selecionados.....	136
Figura 6.05- Contribuições percentuais ao consumo de diesel e emissões veiculares.	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.01: Custo relativo entre tipos de barragens (Massad, 2001)	29
Tabela 3. 02: Consumo energético e elétrico por setor, 2000 (BRASIL, 2001).	41
Tabela 3.03: Potência Elétrica Instalada em 2000 (ANEEL, 2002)	42
Tabela 3.04- Comparação de alguns aspectos ambientais para os estudos encontrados- Parte 1 (adaptado de RIBEIRO, 2003)	61
Tabela 3.05- Comparação de alguns aspectos ambientais para os estudos encontrados- Parte 2 (adaptado de RIBEIRO, 2003)	63
Tabela 5.01 Consolidação das estimativas do ciclo de vida de Itaipu.	85
Tabela 5.02- Consolidação dos ICVs dos insumos de Itaipu.....	91
Tabela 5.03- ICV de Itaipu consolidado.	97
Tabela 6.01- Descrição dos parâmetros usados para caracterização de algumas emissões, por processo.	104
Tabela 6.02- ICV de Itaipu, com dados agregados.	107
Tabela 6.03- Comparação entre o resultado do ICV para diferentes períodos de análise.....	110
Tabela 6.04- Comparação de alguns aspectos ambientais do ciclo de vida de Itaipu com outros estudos semelhantes.	115
Tabela 6.05- Contribuição dos consumos de recursos materiais ao ICV de Itaipu..	121
Tabela 6.06- Contribuição dos consumos de recursos energéticos ao ICV de Itaipu.	122
Tabela 6.07- Aspectos ambientais selecionados do ICV.	122
Tabela 6.08- Recursos energético consumidos no ciclo de vida de Itaipu.....	133
Tabela 6.09- Comparação das emissões veiculares.	138
Tabela 6.10- Comparação das emissões veiculares, sem incluir as máquinas de construção	140
Tabela 6.11- Dados de emissões atmosféricas de fontes móveis para a RMSP (CETESB, 2002)	142
Tabela 6.12- Comparação de emissões veiculares (adaptado de CETESB, 2002). .	142
Tabela 6.13- Comparação de alguns aspectos ambientais do ciclo de vida de Itaipu com a operação de usinas termelétricas paulistas.	144

LISTA DE ABREVIATURAS

ABM: Associação Brasileira de Metais;
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ACV: Análise de Ciclo de Vida;
AICV: Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida;
ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica;
ANP- Agência Nacional do Petróleo;
BEN: Balanço Energético Nacional;
CBDB: Comitê Brasileiro de Barragens;
CESP: Companhia Energética de São Paulo;
CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental;
COPPE: Inst. Alberto Luiz Coimbra de Pós- Graduação e Pesquisa de Engenharia;
CV: Ciclo de Vida;
EIA: Estudo de Impacto Ambiental;
EPA: *United States Environmental Protection Agency*;
EPD: *Environmental Product Declaration*;
FC: Fator de capacidade;
GP2: Grupo de Prevenção da Poluição da Escola Politécnica da USP;
IBS: Instituto Brasileiro de Siderurgia;
ICV: Inventário de Ciclos de Vida;
IEA: *International Energy Agency*;
INPA: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia;
IPCC: International Pannel on Climate Change;
IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
ISO: *International Organization for Standardization*;
ITAL: Instituto de Tecnologia de Alimentos;
MD: Margem direita;
ME: Margem esquerda;
MME: Ministério das Minas e Energia;
MSA: *Maximum size of agregate* (tamanho máximo do agregado);
OECD: *Organization for Economic Co-operation and Development*;
ONS: Operador Nacional do Sistema;

ORNL: *Oak Ridge National Laboratory*;
PCH: Pequenas Centrais Hidrelétricas;
PECE: Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica;
PNUMA: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento;
RIMA: Relatório de Impacto Ambiental;
RMSP: Região Metropolitana de São Paulo;
SETAC: *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*;
SIESE: Sistema de Informações Empresariais do Setor Elétrico;
SIN: Sistema Interligado Nacional;
UF: Unidade Funcional;
UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro;
UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina;
UNEP: *United Nations Environmental Programme*;
UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas;
USP: Universidade de São Paulo, e
WCD: World Commission on Dams.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2. OBJETIVOS.....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 A METODOLOGIA DA ACV	11
3.1.1 <i>Conceitos Básicos</i>	11
3.1.2 <i>Histórico da ACV</i>	13
3.1.3 <i>Usos da ACV</i>	14
3.1.4 <i>Metodologia da ACV</i>	15
3.2 USINAS HIDRELÉTRICAS	26
3.2.1 <i>Conceitos Básicos</i>	26
3.2.2 <i>Impacto Ambiental de Usinas Hidrelétricas</i>	37
3.2.3 <i>Hidrelétricas e a matriz energética brasileira</i>	40
3.3 USO DA ACV EM SISTEMAS ENERGÉTICOS	44
3.3.1 <i>Conceito de sistema energético</i>	44
3.3.2 <i>ACV e sistemas energéticos</i>	46
3.3.3 <i>Considerações sobre o escopo de sistemas energéticos em ACV</i>	49
3.3.4 <i>Recomendações para estudos de ICV de usinas hidrelétricas</i>	54
4. METODOLOGIA UTILIZADA	66
4.1 SIGNIFICADO DE “MODELO” NO MÉTODO CIENTÍFICO	66
4.2 ESTABELECIMENTO DE UM MODELO REPRESENTATIVO	67
4.3 ADAPTAÇÕES METODOLÓGICAS SOBRE A NORMA NBR ISO 14.040	70
4.4 SOBRE OS RECURSOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS	72
5. INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA DE ITAIPU.....	75
5.1 DEFINIÇÕES.....	75
5.1.1 <i>Objetivo</i>	75
5.1.2 <i>Escopo</i>	75
5.2 INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA.....	82
5.2.1 <i>Preparação para a coleta de dados</i>	82
5.2.2 <i>Procedimento de cálculo</i>	97
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	101
6.1 SOBRE O SIGNIFICADO DA UNIDADE FUNCIONAL	102

6.2	AGREGAÇÃO DE DADOS SEMELHANTES.....	102
6.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS PARA O HORIZONTE DE ANÁLISE.....	109
6.4	COMPARAÇÃO COM ESTUDOS INTERNACIONAIS SEMELHANTES.....	113
6.5	SELEÇÃO DE ASPECTOS AMBIENTAIS RELEVANTES.....	118
6.6	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DOS PROCESSOS AOS ASPECTOS SELECIONADOS..	123
6.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS EMISSÕES VEICULARES.....	137
6.8	COMPARAÇÃO SIMPLIFICADA DOS DADOS COM OUTRA FORMA DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE	143
6.9	CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DOS DADOS DESTES ICV EM ESTUDOS DE ACV DE PRODUTOS	144
6.10	PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DAS ESTIMATIVAS REALIZADAS	146
6.10.1	<i>Limitações das fronteiras adotadas</i>	147
6.10.2	<i>Limitações da qualidade dos dados utilizados.</i>	147
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	152
7.1	CONCLUSÕES GERAIS SOBRE A REALIZAÇÃO DA DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	152
7.2	CONCLUSÕES GERAIS SOBRE OS VALORES OBTIDOS	154
7.3	CONCLUSÕES A RESPEITO DAS CONTRIBUIÇÕES DOS PROCESSOS DO CICLO DE VIDA AO ICV	155
7.4	CONCLUSÕES SOBRE O USO DESTES RESULTADOS	157
7.5	CONSOLIDAÇÃO DAS CONCLUSÕES	158
7.6	RECOMENDAÇÕES	160
7.7	COMENTÁRIOS SOBRE O ATENDIMENTO DOS OBJETIVOS PROPOSTOS.....	162
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	165

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Transpondo toda a história do universo proporcionalmente dentro do período de um ano, com o *big-bang* ocorrendo na zero hora do dia primeiro de Janeiro e o atual momento sendo a meia-noite do dia 31 de Dezembro, teríamos o surgimento de nosso sistema solar apenas no dia 9 de Setembro, o aparecimento dos primeiros mamíferos em 26 de Dezembro, o primeiro ser humano às 22h e 30 min de 31 de Dezembro e o Renascimento somente ocorreria às 23h 59min e 58s do mesmo dia, faltando apenas dois segundos para o final do ano (SAGAN, 1980).

Nesta representação metafórica do transcurso do tempo, o que entendemos por “história”, período que se inicia como surgimento da agricultura no Período Neolítico e se estende até a atualidade, ocuparia apenas os últimos 40 segundos. Neste curto espaço de tempo o ser humano desenvolveu toda sua civilização, multiplicando-se, ocupando praticamente todos os ecossistemas do planeta, consumindo recursos naturais, gerando rejeitos de suas atividades, e criando sua produção cultural - como as obras do Renascimento.

De acordo com PONTING (1995), na maior parte de sua história os seres humanos obtiveram sua subsistência através de uma combinação de fatores simples, como a caça e acúmulo de alimentos, sendo em sua maior parte componentes de pequenos grupos nômades. Esta característica, além de ter permitido ao ser humano se espalhar pelo globo, consiste na forma de organização humana que até hoje impingiu os menores danos ao meio natural, sendo admitida por toda uma linha da antropologia como o único instante no qual a humanidade se encontrou em sua dimensão ótima quanto a estas interações, do ponto de vista quantitativo e qualitativo (cultural). Esta situação no entanto tem se alterado nos últimos dois milênios, sendo esta mudança cada vez mais intensa e significativa, levando a humanidade para padrões sociais cada vez mais distantes deste ponto ótimo de interface com o meio natural.

Na verdade conforme alertado por MEADOWS et al. (1972), quase todas as atividades humanas (desde o crescimento populacional até o consumo de materiais e o desenvolvimento das cidades) podem ser representadas quantitativamente por curvas exponenciais crescentes no tempo. A população mundial, por exemplo, que no ano de 1700 não passava de 500 milhões de pessoas, em 1800 era de quase 1

bilhão e em 2000 atingiu os 6 bilhões. Segundo os autores pode-se representar o consumo de diversos recursos, ou a emissão de rejeitos, por curvas semelhantes. De acordo com as conclusões deste estudo, conhecido como “Relatório do Clube de Roma”, se estas tendências não forem revertidas provavelmente ocorrerá em breve um declínio súbito e incontrolável da qualidade de vida da humanidade, causando um colapso em nossa civilização, e o quanto antes forem implantadas medidas corretivas desta rota catastrófica, maiores serão as possibilidades de reverter esta perspectiva.

Esta constatação leva à reflexão sobre a importância da reformulação dos padrões de intervenção humana no meio natural, preocupado-se não apenas em deste extrair o sustento ao sistema econômico, mas também estabelecendo formas de garantir a continuidade deste sustento.

Conforme exposto por GUATARI (2000), o equilíbrio natural irá depender cada vez mais da intervenção humana, uma vez que a própria vida no planeta se encontra ameaçada pelas transformações promovidas pelo progresso técnico-científico. Esta percepção porém não deve negligenciar o progresso, que reconhece-se promove enormes benefícios à qualidade de vida humana, como por exemplo a oferta de antibióticos ou das já citadas obras do Renascimento, ambos de indiscutível valor para nossa sociedade. O que se evidencia sim, é a necessidade iminente de buscar-se novas formas, ambientalmente mais adequadas, de se promover não apenas o crescimento quantitativo, mas principalmente o desenvolvimento qualitativo de nossa sociedade.

Nesta ótica devemos considerar que, sob certo ponto de vista, a história da humanidade pode ser entendida como um processo evolutivo, tanto no modo desta satisfazer suas necessidades como das próprias necessidades, conforme coloca ANDERY et al. (1988). Todas as estruturas desenvolvidas pelo homem (cidades, agricultura, indústrias, etc) têm o objetivo de, a partir de bens naturais, fornecer satisfação destas necessidades, que há muito já ultrapassam as biologicamente determinadas.

No entanto este processo de conversão de recursos naturais em satisfação de necessidades traz consigo conseqüências indesejáveis, como a exaustão de recursos não renováveis, a geração de resíduos e a degradação da qualidade ambiental. Estes problemas, até há poucas décadas de relegada importância, têm passado a ser foco de

atenção de diversos grupos da sociedade. Este aumento de preocupação não é sem motivo, e justifica-se por um incremento crescente a taxas de crescimento cada vez maiores, dos impactos humanos sobre o meio natural. Como bem exposto por RIBEIRO; SILVA (2002a; 2002b), os principais motivos deste crescimento dos impactos são o crescimento populacional, o aumento do consumo *per capita* de bens e serviços e o aumento da complexidade dos sistemas produtivos, que conjuntamente tem demandado uma atividade cada vez maior dos meios de produção humanos, impingindo pressões crescentes sobre as bases de recursos e os serviços ambientais prestados pelos ecossistemas.

Desta forma, podemos dizer que para satisfazer suas necessidades a sociedade demanda bens e serviços, que para serem ofertados provocam impactos ambientais. Surge desta percepção a noção, relativamente nova embora bastante evidente, de que a origem última dos impactos ambientais encontra-se no consumo de bens e serviços. Esta posição é defendida por WENZEL et al.(1997), para quem os impactos ambientais são atribuídos ao crescente grau de oferta e consumo de produtos, conceito que apresenta uma nova vertente para a avaliação ambiental, desenvolvida apenas muito recentemente: o *enfoque sobre produto*.

Tradicionalmente as avaliações ambientais têm sido realizadas com o que hoje se denomina *enfoque sobre o processo*, uma abordagem que atua sempre observando as entradas e saídas de cada operação, processo ou instalação produtiva, e geralmente possui seu escopo totalmente imerso no domínio de uma única corporação. É o caso por exemplo de sistemas de gestão ambiental, auditorias ambientais e mesmo os processos de licenciamento e suas ferramentas, como os Estudos e Relatórios de Impacto Ambiental – EIA/RIMA.

No entanto, embora o enfoque sobre processos tenha tido excelentes resultados na redução da degradação ambiental, em muitos países, de acordo com WENZEL et al. (1997) não é suficiente para obter as necessárias mudanças rumo a formas mais adequadas de satisfação de necessidades, e principalmente na busca de um desenvolvimento “mais sustentável”. Mesmo reduzindo as maiores fontes individuais de emissões, afirma o autor, o impacto ambiental total em algumas áreas pode estar aumentando devido ao crescente fluxo de produtos e outras atividades, que embora

apresentem pequenos impactos isoladamente, somados apresentam impactos relevantes.

Esta preocupação com a chamada “sustentabilidade” tem feito surgir a abordagem de enfoque sobre o produto que, como o próprio nome indica, preconiza que se realize a avaliação ambiental não mais tendo como objeto de análise o processo, mas sim o produto, ou melhor, a função à qual este produto se propõe a cumprir. Esta mudança de paradigma pressupõe que os produtos se destinam a satisfazer determinada necessidade, por meio do cumprimento de uma função. Para que esta seja realizada é necessário que exista o chamado *ciclo de vida do produto*, ou seja, uma cadeia de processos e atividades que se estendem desde as etapas de extração dos necessários recursos naturais até a manufatura, transporte, uso e descarte após o uso do produto. Esta abordagem, conhecida como “do berço ao túmulo”, tem sido considerada a nova tendência de orientação de políticas e práticas ambientais e tem, na metodologia conhecida como Análise de Ciclo de Vida (ACV), sua principal ferramenta. Esta visão é apresentada por diversos autores internacionais, embora no Brasil ainda seja pouco difundida.

No Brasil a ACV tem sido, há algum tempo, tema de pesquisa de algumas instituições, sendo a maioria, senão a totalidade dos estudos publicados, oriundos de universidades.

Neste contexto, cabe destacar o trabalho do GP2- Grupo de Prevenção da Poluição, da Escola Politécnica da USP, que há mais de cinco anos desenvolve diversas atividades de pesquisa, ensino e extensão no que diz respeito a esta metodologia. O presente trabalho, como será adiante comentado, integra uma destas linhas de estudo. No âmbito destas pesquisas há já dissertações de mestrado concluídas, destacando-se duas delas. A primeira (KULAY, 2000) desenvolve um modelo de ACV para o Brasil e o aplica à produção de um tipo de fertilizante, o que foi primordial às pesquisas da época, uma vez que ainda não havia a versão brasileira da norma sobre metodologia para ACV (ABNT, 2001). A segunda por sua vez realizou um estudo comparativo entre diversos programas de computador dedicados à metodologia de ACV, com vistas a estudar as vantagens de cada um frente às necessidades do país nesta seara (BENJAMIN, 2001). Além disso, o grupo é atualmente responsável por uma disciplina de pós-graduação dedicada exclusivamente à ACV.

Ainda no âmbito da Escola Politécnica da USP, é digno de nota o trabalho desenvolvido pelo GEPEA- Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, onde além de artigos foi realizada uma dissertação de mestrado tratando da aplicabilidade da ACV no Planejamento Integrado de Recursos (CARVALHO, 2000).

Ainda dentro das pesquisas de uso da ACV na área da energia, pode-se citar o trabalho desenvolvido no PIPGE- Programa Interunidades de Pós- Graduação em Energia, da USP, por MARTINS (1999), onde avalia-se o uso desta ferramenta na gestão de empreendimentos energéticos.

Outra linha de pesquisa na área, que utiliza a ACV como ferramenta de comparação ambiental entre tecnologias, é desenvolvida no Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da USP. Até o momento dois trabalhos de mestrado já foram publicados com esta abordagem, um que compara diferentes tipos de cimento Portland, cada qual com distinta composição de matérias- primas (CARVALHO, 2002), e outro onde são avaliadas as contribuições ao efeito estufa do ciclo de vida de diferentes sistemas de aquecimento residencial (TABORIANSKI, 2002).

O intuito destas referências não é relacionar todos os trabalhos relacionados à ACV desenvolvidos no país, o que foge ao escopo deste estudo. Deve-se no entanto, citar que além destes há diversos outros estudos de ACV já desenvolvidos, e outros ainda em desenvolvimento, por núcleos de pesquisa de diversas instituições, como outros grupos da USP, UNICAMP- Universidade Estadual de Campinas, ITAL- Instituto de Tecnologia de Alimentos, UFSC- Universidade Federal de Santa Catarina, entre outras instituições.

Deve-se ressaltar no entanto que, atualmente no Brasil, a maior parte dos trabalhos desenvolvidos na área da ACV trata-se de estudos que em alguns casos avaliam as possibilidades de aplicação da metodologia, em outros, da aplicação direta da ACV.

Esta constatação, embora não reduza o valor destes trabalhos, denota a necessidade de um re-direcionamento da pesquisa científica na área, uma vez que já se demonstrou a utilidade da ACV, mas ainda não foram desenvolvidas as condições para sua execução com qualidade.

Para que a ACV possa ser efetivamente usada no país no entanto, considera-se imprescindível que desenvolvam-se algumas condições *sine qua non*, tais como a

divulgação da metodologia e seus benefícios, critérios e metodologia adaptados às condições do país, e principalmente sejam disponibilizadas informações sobre os ciclos de vida de insumos básicos, por meio de bancos de dados a exemplo do que é feito na maioria dos países onde a ACV é amplamente utilizada.

Este último requisito tem sido constantemente citado como a principal barreira ao pleno uso da metodologia no Brasil por todos aqueles que abordam a questão, como por exemplo mas não somente CARVALHO (2000), CARVALHO (2002), KULAY (2000), MARTINS (1999), RIBEIRO (2003), RIBEIRO; MARTINS (2001), RIBEIRO; SILVA (2002a, 2002b), SÁNCHEZ (2001), SILVA (2001), YOKOTE (2003), TABORIANSKI, (2002), entre tantos outros.

Esta alegação justifica-se de fato, ao se constatar que de posse das bases de dados dos insumos e matérias-primas de um determinado ciclo de vida de produto, a tarefa de levantar os dados para o estudo de ACV de um produto é intensamente simplificada, reduzindo em grande parte o tempo e os recursos despendidos nesta tarefa. Tendo isso em conta o que se realiza é que, uma vez disponíveis bases de dados dos principais insumos, os estudos de ACV possuam não só mais qualidade e confiabilidade, mas sejam mais acessíveis aos diversos interessados.

Considerando esta possibilidade, já verificada em outros países, espera-se que a disponibilização de bases de dados específicas incremente a quantidade de estudos de ACV realizados e considerando que a cada estudo criam-se novos inventários de processos, pode-se inferir que o processo se retro-alimenta, num processo em “espiral de melhoria contínua”.

No entanto, o início deste processo é uma tarefa de alto custo em tempo e recursos, além de não assegurar retorno algum ao executor, ao menos em médio prazo, e ser plena de incertezas e obstáculos. Por conta destas dificuldades, o desenvolvimento de bases de dados para ACV parece não interessar à iniciativa privada, embora esta por diversas vezes tenha se manifestado como se interessada em utilizá-las uma vez disponíveis. Desta forma, parece caber ao poder público, eminentemente às universidades e institutos de pesquisa mantidos pelo governo, o desenvolvimento destes primeiros bancos de dados.

Tendo em consideração esta premissa, e de modo a contribuir no sentido de fomentar o uso da ACV no Brasil, o GP2 decidiu dedicar uma linha de pesquisa relativa ao

desenvolvimento de bancos de dados brasileiros para ACV. O primeiro projeto desta linha de pesquisa, no qual este trabalho está inserido, concerne à eletricidade utilizada no país, dividido no estudo da geração, da transmissão e da distribuição deste insumo, cada qual tendo como encaminhamento uma dissertação de mestrado, sendo o presente trabalho referente à etapa de geração.

Assim, pode-se dizer que especificamente este trabalho pretende contribuir ao levantamento do inventário de ciclo de vida (ICV) da geração elétrica, sendo uma primeira aproximação para as condições do Brasil.

Quanto à justificativa para sua realização, entende-se que este projeto se justifica tanto pelos resultados a serem gerados como pela iniciativa em si, que se espera seja fomentadora de outras da mesma natureza.

No que tange aos resultados esperados, a justificativa encontra-se no atendimento à necessidade, já citada, de bases de dados brasileiras para ACV.

Desta forma, por mais que seja uma estimativa inicial, este trabalho pretende trazer para ACVs de produtos e serviços brasileiros informações mais precisas do que as atuais, baseadas em bancos de dados internacionais, que embora possam ser mais completos referem-se a outros países, baseando-se portanto em realidades totalmente distintas.

Em relação à escolha da eletricidade especificamente, considerando as peculiaridades de nossa matriz energética, mais especificamente o perfil da geração de energia elétrica, o uso de dados de outros países traria grande grau de incerteza aos estudos, comprometendo assim a confiabilidade de seus resultados. Mesmo países que possuem forte vocação hidrelétrica, como Canadá ou Noruega e Suécia, possuem condições climáticas, topográficas, entre outras, totalmente distintas, o que tornaria, do ponto de vista de inventário de ciclo de vida, o uso de resultados de suas hidrelétricas tão incerto quanto o uso de uma base de dados francesa, de matriz nuclear, por exemplo.

Ademais, por avaliar as diversas etapas do ciclo de vida de uma usina hidrelétrica, este estudo pode auxiliar na aquisição de um maior conhecimento a respeito da magnitude dos aspectos ambientais desta forma de geração. Ou seja, seus resultados poderão ser utilizados para inferir quais são as atividades com maior potencial de

impacto neste ciclo de vida, do ponto de vista de consumos e emissões de material e energia, e futuramente compará-los com outras alternativas de geração ou mesmo buscar sua minimização no contexto de um planejamento energético orientado inclusive por fatores ambientais.

Já quanto à iniciativa em si, o presente projeto se insere num contexto mais amplo, sendo parte de um piloto para a criação de uma base de dados brasileira para ACV. Esta talvez seja a principal contribuição deste trabalho, uma vez que sem dados representativos qualquer estudo de ACV torna-se não apenas ineficaz, mas perigoso, uma vez que pode inclusive ser usado para subsidiar tomadas de decisão equivocadas. Cabe salientar que nenhuma forma de ciência é inócua, e os realizadores de ACVs devem se conscientizar de que seus estudos podem, cedo ou tarde, servir de argumentação técnico-científica para tomada de decisões, que podem ter seus reflexos na sociedade. Deste modo, devem assumir certa responsabilidade sobre a qualidade dos resultados divulgados.

Neste sentido, a realização do projeto onde se insere este estudo se justifica não apenas por disponibilizar dados para ACV, mas também por incitar outros pesquisadores a prestar suas contribuições ao desenvolvimento de bases de informação brasileiras confiáveis para ACV.

Ademais, a realização do projeto visa iniciar no país o desenvolvimento de uma nova competência, relacionada à realização deste tipo de pesquisa. Espera-se assim com a realização deste projeto que os estudos seguintes sejam não apenas mais completos e precisos, por já disporem dos dados referentes à energia elétrica, mas também de mais fácil realização, uma vez que muitas das dificuldades metodológicas encontradas já poderão ter sido, senão superadas, ao menos identificadas.

Sendo assim, resumidamente, a realização deste projeto de pesquisa se justifica por:

- fornecer dados nacionais para outros estudos de ACV, permitindo sua realização ou melhorando sua qualidade e confiabilidade;
- quantificar os aspectos ambientais do ciclo de vida de uma hidrelétrica, permitindo:
 - comparação com outras formas de geração de eletricidade;

- identificação dos pontos de maiores aspectos (*hot spots*), auxiliando a busca por otimização de desempenho ambiental deste ciclo de vida;
- planejamento de ações de pesquisa para busca de processos menos impactantes;
- ser parte de um estudo sobre a constituição de bases de dados para ACV no Brasil, fomentando e fornecendo subsídios para a realização de outros estudos de mesma natureza.

2. OBJETIVOS

Pode-se dizer que este trabalho possui como objetivo geral contribuir ao desenvolvimento das condições necessárias à realização de estudos de ACV no país, participando particularmente do desenvolvimento de bases de dados para ACV representativas da realidade nacional, uma vez que se insere dentro de uma linha de pesquisa que possui esta finalidade.

De modo mais específico no entanto, pode-se afirmar que os objetivos deste trabalho de mestrado são:

- gerar e disponibilizar um inventário de ciclo de vida representativo da geração de eletricidade em usinas hidrelétricas no Brasil;
- identificar os aspectos ambientais mais significativos no ciclo de vida de uma usina hidrelétrica no Brasil;
- apontar quais os processos envolvidos no ciclo de vida de uma hidrelétrica que originam os aspectos ambientais mais significativos (*hot spots*);
- contribuir ao desenvolvimento do conhecimento nacional sobre a execução de estudos de ICV para bases de dados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente pesquisa bibliográfica possui três vertentes, cujos principais resultados serão aqui apresentados de forma sintetizada: a metodologia da ACV, as usinas hidrelétrica e a aplicação da ACV em sistemas de energia, com ênfase na geração hidrelétrica.

3.1 A metodologia da ACV

Atualmente é bastante grande o número de publicações internacionais acerca da ACV, tratando de diversos aspectos da metodologia, de suas aplicações e potenciais de uso, de suas qualidades e limitações, etc. No entanto, uma vez que o objetivo deste trabalho é a realização de um ICV, e não a discussão da ACV enquanto metodologia, nem tampouco das condições para seu uso ou de suas propriedades como recurso de avaliação ambiental, não se pretende estender por demais as considerações acerca deste tema.

Não obstante, por tratar-se a ACV de assunto ainda pouco difundido no Brasil, e cuja parte da metodologia será aplicada para o desenvolvimento desta pesquisa, decidiu-se incorporar a esta Revisão Bibliográfica alguns aspectos tidos como relevantes sobre conceitos, histórico, usos e metodologia da ACV. Para informações mais detalhadas e discussões mais profundas, recomenda-se sejam consultadas as diversas referências citadas ao longo do texto, muitas delas dedicadas exclusivamente a estes aspectos.

3.1.1 Conceitos Básicos

De modo a satisfazer suas necessidades o ser humano desenvolve uma série de instalações e estruturas produtivas (cidades, fábricas, cultivos, etc), ao qual conjunto se denomina *meio antrópico*. Para seu funcionamento, este interage com o meio natural de três formas (SILVA, 2001): consumindo recursos naturais, emitindo rejeitos e transformando o espaço. A metodologia de ACV trata dos dois primeiros casos: os fluxos de matéria e energia entre os meios natural e antrópico.

De acordo com a ABNT (1996), denomina-se estes elementos que podem interagir com o meio ambiente como *aspectos ambientais*, e às modificações do meio ambiente que ocorrem como consequência destes, como *impactos ambientais*.

Como dito, o objetivo do ser humano na criação do meio antrópico é a satisfação de suas necessidades, o que se dá pelo consumo de bens e serviços. Estes (doravante denominados apenas pelo termo *produto*, subentendendo ambos), para exercerem suas funções e satisfazer as necessidades humanas precisam ter suas matérias-primas extraídas, beneficiadas, precisam igualmente ser produzidos, distribuídos, são utilizados e após sua vida útil, descartados. Ao conjunto dos processos que compõe esta cadeia atribui-se a denominação de *ciclo de vida* do um produto, sendo esta abordagem conhecida como “do berço ao túmulo”.

Considerando que cada uma destas etapas possui seus aspectos ambientais, há atualmente um consenso de que para avaliar ambientalmente um produto é necessário utilizar uma metodologia que contabilize esta totalidade de interações, que ocorrem em diferentes processos, e muitas vezes em distinto espaço e tempo. Esta contabilidade, e a avaliação dos efeitos deste conjunto de aspectos em impactos, tem sido o papel desempenhado pela ACV.

Desta forma, define-se a ACV como (ABNT, 2001):

“uma técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto mediante:

- a compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto;
- a avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas;
- a interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos do estudo”.

Cabe dizer que por “sistema de produto” entende-se o conjunto dos processos que realiza a função do produto (ABNT, 2001), ou seja, os processos que, segundo o modelo definido para o estudo, compõe o ciclo de vida do produto em questão.

3.1.2 Histórico da ACV

Segundo VIGON et al. (1993), os primeiros estudos de avaliação ambiental de produtos situam-se no início da década de 60, sendo inicialmente inventários de consumo energético. No final da década no entanto, e mais ainda após a divulgação do relatório do Clube de Roma (MEADOWS et al., 1973), houve um aumento da preocupação com o esgotamento de recursos materiais, fazendo com que seu consumo fosse igualmente incluído nas análises.

O estudo mais conhecido desta fase inicial da ACV foi a análise que a Coca-Cola encomendou para o *Midwest Research Institute*, cujo relatório foi publicado em 1969, comparando diversas embalagens de bebida no que diz respeito a emissões ao ambiente e consumo de recursos naturais (CHRISTIANSEN, 1996; VIGON et al., 1993). Este tipo de estudo passou a receber o nome de *Resource Environmental Profile Analysis* -REPA (WENZEL et al., 1997), juntamente com qual desenvolveu-se na Europa o método *Ecobalance* (CHRISTIANSEN, 1996), bastante semelhante.

Segundo CURRAN (1996), estes trabalhos tiveram posteriormente grande repercussão, principalmente entre 1973 e 1975 quando devido à crise do petróleo governos começaram a demandar uma grande quantidade de estudos detalhados de alternativas energéticas aos combustíveis fósseis. No entanto, passado o período crítico da crise o interesse pela ACV decresceu, e na segunda metade da década de 70 foram realizados poucos estudos.

Na década de 80 porém, com a preocupação com o destino de resíduos, principalmente de embalagens, ressurgiu o interesse por ferramentas de comparação e avaliação de desempenho ambiental (VIGON et al., 1993). Em 1985 a ACV é escolhida pela Comunidade Européia para o auto monitoramento pelas empresas de seus consumos de matéria e energia (CHRISTIANSEN, 1996; FAVA et al., 1990).

Desde então o interesse pela ACV vem aumentando, com uma diversificação cada vez maior de usos e usuários (WENZEL et al., 1997). Diversas instituições tem buscado uma base conceitual sólida e uniforme, sendo destacado o papel desempenhado pela SETAC- Society of Environmental Toxicology and Chemistry, que tem trabalhado com a ACV desde 1990, e desde então tem sido o principal fórum de discussão metodológica sobre a metodologia (VIGON et al., 1993).

Quanto à padronização propriamente dita, a ISO- *International Organization for Standardization*, tem trabalhado em torno da ACV desde 1993 (WENZEL et al., 1997), tendo reservado para a ACV a família 14.040. Atualmente as seguintes normas encontram-se publicadas (ISO, 2003):

- ISO 14.040: *Environmental management – Life-Cycle Assessment – Principles and framework* (ISO, 1997);
- ISO 14.041: *Environmental management – Life-Cycle Assessment – Goal scope and definition and life cycle inventory analysis* (ISO, 1998);
- ISO 14.042: *Environmental management – Life-Cycle Assessment –Life cycle impact assessment* (ISO, 2000a);
- ISO 14.043: *Environmental management – Life-Cycle Assessment –Life cycle interpretation* (ISO, 2000b);

Além desta normas, a ISO publicou dois Relatórios Técnicos (TR) e uma Especificação técnica (TS), a saber (ISO, 2003):

- ISO/ TR 14.047: *Environmental management- Life cycle impact assessment- Examples of application of ISO 14.042* (ISSO, 2003b);
- ISO/ TS 14.048: *Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format* (ISO, 2002);
- ISO/ TR 14.049: *Environmental management - Life cycle assessment - Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis* (ISO, 2000c);

No Brasil, a ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou até o presente momento apenas a versão da ISO 14.040, a NBR ISO 14.040- Gestão Ambiental- Avaliação do Ciclo de Vida- Princípios e estrutura (ABNT, 2001), lançada em Novembro de 2001.

3.1.3 Usos da ACV

Enquanto metodologia de avaliação ambiental focada sobre o produto, o que a ACV proporciona são informações a respeito das interações significativas entre o sistema do produto e o meio ambiente. Compreendendo a ACV como uma ferramenta de obtenção e compilação de informações podemos estabelecer sua grande

funcionalidade, que engloba os diversos usos da metodologia: o fornecimento de informação para o suporte à tomada de decisões (JENSEN et al., 1997).

Segundo o uso que se faz, podemos dividir as aplicações da ACV basicamente em duas grandes vertentes:

1. identificação de oportunidades de melhoria de desempenho: busca, por meio da ACV, a origem das principais contribuições aos impactos ambientais potenciais de um ciclo de vida de produto. Uma vez que se sabe o quanto cada etapa contribui, pode-se proceder ações de planejamento direcionadas à minimização dos aspectos, e
2. comparação ambiental entre produtos de função equivalente: uma vez levantados os aspectos ambientais de um ciclo de vida, pode-se compará-lo a outro, podendo ser esta comparação tanto *stricto sensu*, entre produtos distintos e de mesma função disponíveis no mercado, como a comparação de um produto específico com um padrão determinado para aquele tipo de produto, como feito no caso dos rótulos e declarações ambientais. A idéia neste caso é realizar a avaliação de quais os aspectos ambientais mais significativos, e geralmente quais os potenciais impactos respectivos, de diferentes formas de cumprir uma determinada função.

Dentro desta divisão são diversas as aplicações da ACV, e cada tipo de usuário aplica a metodologia para suas necessidades específicas. Exemplos de aplicações são as rotulagens ambientais, programas de prevenção a poluição, planejamento estratégico, seleção de fornecedores, marketing do produto, etc.

3.1.4 Metodologia da ACV

Neste capítulo apresenta-se a metodologia de ACV recomendada pela norma ISO 14.040 (ISO, 1997), já com versão em português pela ABNT (ABNT, 2001). Esta norma descreve os princípios e a estrutura para se conduzir e relatar estudos de ACV, e inclui certos requisitos mínimos (ABNT, 2001). De acordo com a norma, a ACV é realizada através das etapas apresentadas na Figura 3.01.

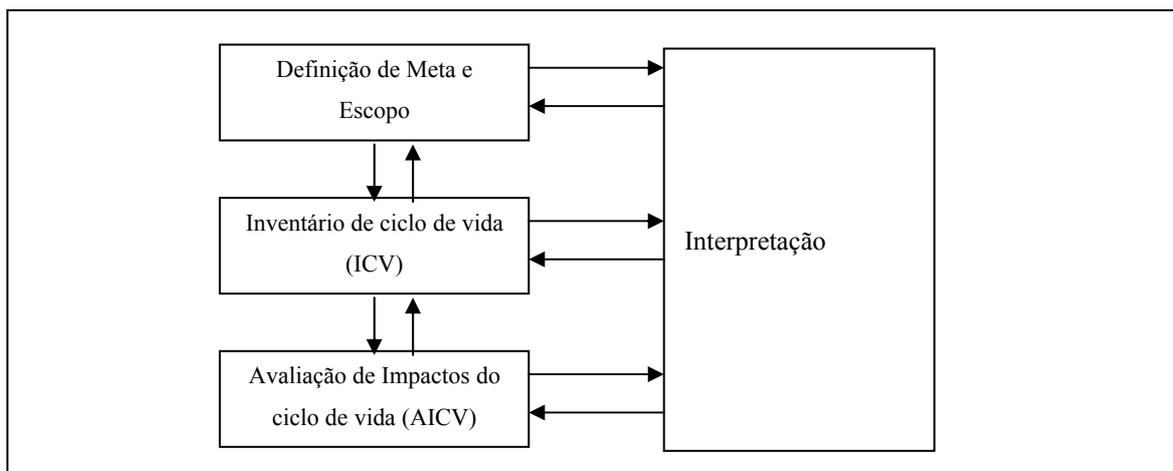


Figura 3.01: Estrutura das etapas da ACV (ABNT, 2001)

A seguir, faz-se uma descrição sucinta de cada uma destas etapas.

a) Definição de objetivo e escopo

Segundo a ABNT (2001), são determinados na etapa de definições:

- *objetivo do estudo*: deve, de modo inequívoco, declarar a aplicação pretendida, as razões para sua condução e seu público-alvo.
- *escopo do estudo*: deve identificar e definir o objeto de análise e limitá-lo para incluir o que é significativo (WENZEL et al., 1997). Segundo a norma (ABNT, 2001), deve considerar e descrever claramente os seguintes itens:
 - sistema de produto: de acordo com a norma (ABNT, 2001) o sistema de produto consiste no conjunto de unidades de processo, conectadas material ou energeticamente, que realiza uma ou mais funções definidas. É portanto a pormenorização do modelo a ser estudado na ACV, descendo muitas vezes ao nível das operações unitárias envolvidas;
 - função do sistema de produto: define a que se presta o sistema que está sendo analisado, ou seja, qual sua função;
 - unidade funcional (UF): é a unidade de medida da função anteriormente estabelecida. Deve prover uma referência para a qual as quantificações das entradas e saídas do sistema (aspectos ambientais) serão normalizadas (ABNT, 2001);

- fronteiras do sistema de produto: a definição das fronteiras do estudo representa a delimitação da sua abrangência, considerando diversas dimensões. De acordo com TILLMAN; BAUMANN (1995), estas são:
 - i. *fronteiras em relação ao sistema natural* : são os limites que indicam onde seu ciclo de vida se inicia e termina, em relação ao meio natural;
 - ii. *fronteiras em relação a outros sistemas*: em geral, cada sistema de produto tem associado uma rede de outros sistemas, como produção de insumos, obtenção de matérias-primas, co-produtos gerados, etc. Deve-se delimitar dentro desta rede quais processos serão ou não estudados, sob pena de estarmos tentando abranger um universo demasiadamente amplo;
 - iii. *fronteiras geográficas*: define onde cada processo será considerado como realizado, uma vez que cada localidade possui características que podem fazer o resultado se tornar inadequado (por exemplo, cada país possui uma matriz energética, e o uso de um modelo de geração da Alemanha, por exemplo, é inadequado ao Brasil);
 - iv. *fronteira temporal*: considera o momento para o qual os dados levantados terão validade, ou seja, se será estudada uma situação atual, passada ou ainda cenários de futuro, e
 - v. *fronteiras de bens de capital*: determina se serão incluídas ou não no estudo as infra-estruturas necessárias para a realização dos processos (edifícios das fábricas, estradas, etc).

Este estabelecimento de fronteiras em geral se inicia com uma visão geral do sistema de produto, usualmente representada através de um fluxograma de processos. A partir da opinião de especialistas e da sensibilidade do realizador do estudo, define-se uma primeira fronteira. Esta, dependendo das conclusões do inventário, poderá ou não ser alterada (WENZEL et al., 1997).

- procedimento de alocação: diversos processos possuem mais de uma saída de interesse para o sistema produtivo. Além de poder haver mais de um produto, pode-se gerar subprodutos, que são incorporados a processos através de reuso ou reciclagem. Uma vez que todos estes são resultados de interesse para o sistema de produto, é justo que cada um seja responsável por parte do

conjunto de aspectos ambientais do sistema. Para isso desenvolve-se o procedimento de alocação, que busca criar um método de distribuição das contribuições aos impactos entre os diferentes resultados do sistema (WENZEL et al., 1997). A cada produto ou subproduto atribui-se então uma parcela dos aspectos que o sistema possui até o momento de sua geração. Existem diversas técnicas de alocação, cada qual segundo um critério, sendo os mais conhecidos o de massa (que aloca proporcionalmente às massas dos produtos do sistema); e o econômico (que o faz proporcionalmente ao valor de mercado de cada produto).

- tipos de impacto e metodologia de avaliação de impactos: Para que seja dada seqüência aos estudos após o inventário, é necessário que se estabeleçam critérios de avaliação dos aspectos ambientais, o que é feito através da definição das *categorias de impacto*.

Categoria de impacto é a denominação genérica dos tipos de impacto que serão considerados no estudo, e sua definição deve ser particular para cada estudo, e de acordo com seu propósito específico. Exemplos são: aquecimento global, acidificação do solo, toxicidade humana, consumo de recursos naturais, etc.

- requisitos dos dados: especificação da precisão dos dados e descrição dos métodos de obtenção e integração dos dados (ISO, 1998).
- análise crítica: na etapa de definições deve-se determinar o modo de condução e o responsável por esta análise (ABNT, 2001), que deve ser realizada ao final do estudo para verificação de sua qualidade.
- tipo e formato do relatório final: segundo a ABNT (2001), os resultados de uma ACV devem ser relatados ao público alvo de forma fiel, completa e exata, e o tipo e formato deste relatório devem ser definidos na etapa de definição do escopo.

b) Inventário de ciclo de vida (ICV)

Conforme posto pela ISO (1998) a etapa anterior de definições provê um plano inicial para a condução do estudo. A presente etapa, de ICV, concerne por sua vez à coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas de um sistema de produto (ABNT, 2001). É importante salientar que a construção do

ICV é iterativa, e considerando que o conhecimento que se tem do sistema aumenta conforme se obtém dados, deve-se proceder sempre que necessário a novas definições de meta e escopo.

Quanto à estrutura do ICV, a ISO (1998) apresenta as seguintes etapas:

i. *preparação para coleta de dados*

Segundo a norma (ABNT, 2001) os dados devem ser coletados para cada unidade de processo constante das fronteiras do sistema. Conforme a norma ISO 14.041 (ISO, 1998), a etapa de definições fornecerá tanto a relação destes processos como a categoria de dados que devem ser obtidos. Uma vez que estes processos podem estar bastante distribuídos no espaço e no tempo, é recomendável que se sigam alguns passos para garantir a uniformidade e consistência do sistema modelado. Estes incluem (ISO, 1998):

- construção de fluxogramas dos processos unitários, incluindo suas inter-relações;
- descrição de cada processo e listagem das categorias de dados a estes associadas;
- determinação das unidades de medida;
- determinação dos métodos de coleta e cálculo para cada categoria de dado, e
- provisão de instruções para documentação de casos especiais, irregularidades, etc.

ii. *coleta de dados*

A coleta de dados é a tarefa mais demorada de uma ACV (WENZEL et al., 1997), e segundo a própria norma (ABNT, 2001) pode ser igualmente intensiva na demanda de recursos. Este problema no entanto pode ser minimizado, principalmente através da criação de bancos de dados, constituídos paulatinamente com a incorporação dos resultados de estudos realizados. A adoção desta prática leva, progressivamente, à redução do tempo e custo de obtenção das informações necessárias para a execução de ACV.

Diversas fontes relacionam as fontes de dados mais usuais. De acordo com WENZEL et al. (1997), há quatro tipos principais de fontes de dados: bancos de dados eletrônicos, dados de literatura, dados passados por terceiros (empresas, órgãos do governo, associações de classe, laboratórios, etc) e medições diretas em campo.

O procedimento adotado para a coleta de dados varia entre diferentes estudos e também entre diferentes tipos de processos, mas é sempre importante registrar todas as informações, fontes dos dados e hipóteses admitidas. De acordo com WENZEL et al. (1997), este procedimento de coleta pode ser realizado, por exemplo, através de: revisão bibliográfica, aplicação de questionários específicos, cálculos teóricos a partir de modelos ou medições de campo.

Ao final desta etapa de coleta o que se obtém é uma planilha de aspectos ambientais quantificados para cada processo em separado.

iii. procedimentos de cálculo

Após coletar os dados faz-se necessário que sejam feitos cálculos com o intuito de adequá-los aos processos unitários e à unidade funcional, além de avaliar sua qualidade. Este procedimento pode ser dividido nas seguintes etapas (ISO, 1998):

- validação dos dados: envolve verificações do tipo de balanços de massa e energia, análises comparativas, etc. A intenção destes procedimentos é detectar ainda numa fase inicial quaisquer anomalias existentes. Deve-se também determinar o que será feito na ausência do dado desejado;
- adequação dos dados à unidade de processo unitário: significa transpor os dados obtidos na coleta à base unitária do processo (por exemplo 1 kg de cimento, 1 MJ de energia, etc), fazendo tanto as necessárias alocações das cargas ambientais como a conversão de unidades;
- adequação dos dados à unidade funcional: Para que possamos realizar cálculos sobre todo o sistema (sobre a função deste na verdade) devemos transformar os valores obtidos para cada processo, na base unitária de cada um, a uma mesma base de cálculo referente à unidade funcional;
- agregação dos dados: Por último, nesta etapa deve-se agregar os dados obtidos numa única tabela.

Uma observação importante sobre o tratamento de dados refere-se à unidade na qual são medidos os processos de transporte na ACV. Embora nenhuma norma estabeleça este procedimento, é usual nos estudos de ACV que as etapas de transporte de materiais sejam sempre expressas numa unidade denominada “tonelada- quilômetro” (t.km). Esta unidade refere-se aos aspectos ambientais do transporte de uma tonelada de carga por cada quilômetro percorrido.

Esta diferenciação da unidade de transporte em relação às demais, ocorre pois é necessário que quando se considere o transporte de um fluxo de referência seja possível medir os aspectos em uma unidade que contemple dois parâmetros: a distância percorrida e a quantidade transportada, às quais os aspectos ambientais são proporcionais (SILVA, 2001).

Na verdade, a medição dos aspectos das etapas de transporte em t.km existe como uma forma de alocar, a cada tonelada transportada, apenas a respectiva parcela dos aspectos ambientais dentre o total impingido ao meio pelo meio de transporte considerado. Desta forma, o cálculo dos valores das contribuições aos aspectos em t.km é obtido dividindo-se cada um dos aspectos referentes a um quilômetro percorrido pelo meio de transporte em questão pela capacidade de carga em toneladas.

iv. refino das fronteiras do sistema

Conforme já dito o ICV é um processo iterativo, ao longo do qual se vai progressivamente obtendo maior conhecimento sobre o objeto de análise. Desta forma, a norma (ISO, 1998) recomenda que as fronteiras do sistema sejam revistas, identificando necessidades de novos refinamentos e dados adicionais. Devem ser realizadas análises de sensibilidade quando necessário, de modo a avaliar a pertinência de:

- excluir estágios do ciclo de vida ou processos que não sejam significantes;
- excluir aspectos ambientais sem representatividade no resultado final, e
- incluir novos processos ou aspectos que sejam julgados relevantes.

c) Avaliação de impactos (AICV)

A avaliação de impactos de ciclo de vida (AICV) tem como propósito avaliar os potenciais impactos ambientais dos aspectos levantados e quantificados no inventário, além de fornecer subsídios para a etapa de interpretação (ISO, 2000a). Segundo CONSOLI et al. (1993), a avaliação de impactos consiste numa técnica que caracteriza e avalia os efeitos da carga ambiental identificada no ICV.

Este procedimento é realizado pelo uso das categorias de impacto, conceito já introduzido anteriormente, que representam problemas ambientais que

potencialmente podem ser provocados (ou incrementados) pelos aspectos ambientais em questão.

A estrutura metodológica e científica da AICV ainda se encontra em desenvolvimento, e nenhuma metodologia ainda é aceita de forma geral (ABNT, 2001). No entanto, de acordo com a norma ISO 14.042 (ISO, 2000a) a AICV é composta de elementos obrigatórios e opcionais, da seguinte forma:

c.1) elementos obrigatórios

- *classificação*: consiste no relacionamento qualitativo entre os aspectos identificados no ICV e as categorias de impacto às quais estes contribuem. É importante ressaltar que muitas vezes algum dos aspectos ambientais do ICV, principalmente algumas emissões de poluentes, podem contribuir para mais de uma categoria de impacto simultaneamente. Deve-se portanto ter cuidado com o modo de realizar a classificação, evitando equívocos.
- *caracterização*: a caracterização consiste na quantificação da classificação, ou seja, na determinação numérica de qual é a contribuição de cada aspecto a cada categoria de impacto (CONSOLI et al., 1993). Este procedimento é feito por meio da conversão dos resultados do ICV em unidades comuns (através de fatores de equivalência, também conhecidos como fatores de caracterização), e posterior agregação de resultados, dentro de cada categoria de impacto (ISO, 2000a).

Ao final da Caracterização obtém-se um valor total de contribuição daquele ciclo de vida para cada categoria de impacto. Este resultado muitas vezes já é o suficiente para os propósitos da ACV, uma vez que permite conhecer, dentro das hipóteses admitidas, as contribuições do ciclo de vida do produto para as categorias de impacto.

c.2) elementos opcionais:

- *normalização*: tem por objetivo prover uma melhor avaliação da magnitude dos resultados da caracterização, calculando a representatividade dos valores encontrados em relação a um valor de referência estabelecido para cada categoria de impacto. Alguns exemplos de valores de referência são: total das emissões (ou uso de recursos) de uma determinada área (país, região, etc) em um ano, ou o

mesmo *per capita*, ou ainda um cenário de referência, elaborado a partir do uso de uma alternativa ao sistema de produto avaliado (comparação entre alternativas) (ISO, 2000a).

- *agrupamento*: nada mais é do que uma reordenação da apresentação das categorias de impacto. Basicamente, segundo a norma ISO 14.040 (ISO, 1997), há duas maneiras de realizar este processo:
 - ordenação das categorias de acordo com seu “tipo”, ou seja, em “efeitos sobre o meio físico”, “efeitos sobre o meio biótico”, “consumo de recursos não-renováveis”, etc.
 - hierarquização das categorias segundo o critério não numérico da ordem de importância (ex: alta, média e baixa importância), o que evidentemente subentende um julgamento de valores. Este procedimento já é um encaminhamento para uma interpretação para a tomada de decisões, e deve ser coerente com os objetivos e escopo do estudo. Cada instituição ou grupo social tem valores e preferências distintos, e portanto em cada situação onde for pesquisado podem haver diferentes hierarquizações, sendo muito importante determinar, também em função do objetivo e escopo, como esta será desenvolvida (ISO, 2000a);
- *valoração (ou ponderação)*: consiste em determinar uma ponderação das categorias de impacto, ou seja, escolher um “peso” relativo entre estas. Dependendo da posterior agregação, essa etapa pode ser útil para converter os valores da normalização de modo a expressar numericamente a preferência ou para agregar as categorias de impacto de modo ponderado formando um único indicador do desempenho ambiental do sistema de produto.

d) Interpretação

O objetivo da etapa de interpretação de uma ACV é combinar, resumir e discutir resultados do estudo (ISO, 2000b), com o intuito de obter fundamentos para conclusões e recomendações que satisfaçam os objetivos inicialmente propostos. Além disso, tem a função de desenvolver uma apresentação dos resultados na forma de um relatório consistente e transparente.

Para efetuar a interpretação são necessários quatro tipos de informação (ISO, 2000b): resultados das etapas anteriores (ICV e/ou AICV), escolhas metodológicas (critérios de alocação, fronteiras, categorias de impacto, etc), juízos de valores admitidos e relação dos envolvidos, seus interesses e obrigações.

De acordo com a norma ISO 14.043 (ISO, 2000b), existem três elementos básicos na interpretação:

d.1) identificação dos temas de relevância:

Uma vez que os resultados do ICV ou do AICV foram assumidos como de acordo com a meta e escopo do estudo, deve-se proceder à identificação dos pontos mais relevantes do estudo. Segundo a norma ISO 14.043 (ISO, 2000b), estes podem ser:

- aspectos do inventário ou suas categorias (uso recursos não renováveis, consumo energia, geração resíduos, etc);
- categorias de impacto, e
- operações unitárias, processos- como transporte, geração vapor, etc.

Existem diversas técnicas para esta identificação, e os procedimentos a serem seguidos variam de caso a caso.

d.2) avaliações:

Esta parte do estudo tem como função determinar a confiabilidade nos resultados, incluindo os temas e relevância identificados anteriormente. Os resultados devem ser apresentados de forma clara e compreensível ao usuário determinado para o estudo. De acordo com a ISO (2000b), pode-se descrever cada uma de suas etapas como segue:

- *análise de abrangência:* tem como objetivo verificar se todas as informações relevantes e dados necessários estão disponíveis e completos. Pode resultar na adição de comentários extras ao relatório do estudo, ou mesmo a revisão do ICV ou do AICV;
- *análise de sensibilidade:* tem como objetivo avaliar a confiabilidade final dos resultados e conclusões, determinado quanto estes são afetados pelas incertezas dos dados, métodos de alocação, cálculos dos indicadores, etc. Esta avaliação deve levar em conta as hipóteses e simplificações feitas na etapa de definições, as

análises de sensibilidade e incerteza já realizadas nas etapas de ICV e AICV e também a opinião de especialistas na área e experiências anteriores.

- *análise de consistência*: avalia o quanto as hipóteses, métodos e dados obtidos são consistentes com as definições iniciais. Verifica-se, por exemplo, as diferenças de qualidade de dados entre as diferentes etapas do ciclo de vida, se houve consideração de variações temporais/espaciais, se a aplicação de alocação e estabelecimento de fronteiras foi adequada, se os elementos da avaliação de impacto estão de acordo com o estabelecido ao início, etc.

d.3) Conclusões, recomendações e relatório

Esta última etapa da ACV tem como objetivo estabelecer conclusões e recomendações para os usuários do estudo. Além disso deve, através do relatório, fornecer uma visão transparente e completa do estudo. Estas ações devem ser feitas como segue (ISO, 2000b):

- *conclusões*: devem ser estabelecidas de modo iterativo com outros elementos da etapa de interpretação, considerando sempre as definições iniciais;
- *recomendações*: sempre que apropriado à meta e escopo estabelecidos, devem ser feitas recomendações aos tomadores de decisão que irão utilizar os resultados da ACV. Estas devem ser baseadas nos resultados do estudo e justificadas de modo a refletir as conseqüências lógicas e razoáveis destes, e
- *relatório*: uma vez que já se tenha considerado o estudo terminado, seus resultados devem ser relatados ao público alvo. O formato deste relatório deve ser definido na etapa de definições do estudo, embora a norma ISO 14.040 (ISO, 1997) relacione alguns itens fundamentais.

Apenas como última observação, a norma ISO 14.040 (ISO, 1997) ainda requer, após o término do estudo a condução de uma avaliação, denominada de *Análise Crítica*, que deve verificar o atendimento da norma pelo estudo quanto à metodologia, dados e relatório. Tanto o realizador do estudo como o modo de condução do mesmo devem ser definidos *a priori*, e a norma (ABNT, 2001) traz considerações a respeito dos objetivos, necessidades, processo e responsáveis por este procedimento.

3.2 Usinas hidrelétricas

A revisão bibliográfica sobre usinas hidrelétricas tem o propósito específico de adquirir o necessário conhecimento do tema para a definição do modelo e do sistema de produto a ser estudado para a realização do ICV. Deve-se portanto manter em mente o foco no levantamento de características construtivas e operacionais, além de buscar identificar ao longo do processo de construção e operação das usinas os aspectos ambientais de importância, ou seja, aqueles referentes a fluxos de materiais e energia que se mostrarem significativos.

Para tanto se dividiu a pesquisa da literatura sobre usinas hidrelétricas em três vertentes: conceitos básicos, impactos ambientais de hidrelétricas e a caracterização das hidrelétricas brasileiras.

3.2.1 Conceitos Básicos

a) Princípio de Funcionamento de uma Hidrelétrica

Entende-se por usina hidrelétrica aquela instalação geradora de eletricidade a partir do aproveitamento de um potencial gravitacional de um fluxo d'água. Basicamente seu princípio de funcionamento consiste no fato de que, uma vez captada, a água deva ser conduzida por dutos até uma turbina, que possui um eixo solidário a um gerador elétrico. Uma vez que a água movimentada esta turbina, gira-se o rotor do gerador, induzindo uma corrente elétrica em seu estator. Desta forma, obtém-se uma conversão energética que pode ser esquematizada como exposto na Figura 3.02.

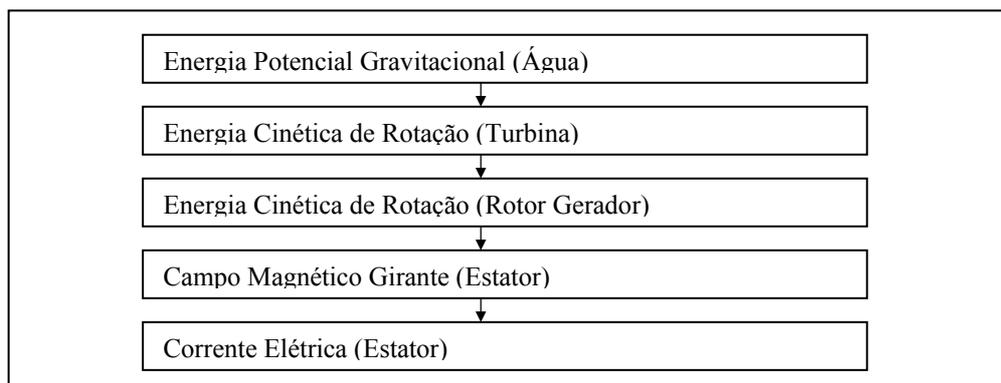


Figura 3.02: Cadeia de Conversão energética numa hidrelétrica.

b) Componentes genéricos de uma usina hidrelétrica

De modo bastante simples e genérico, podemos dizer que os principais componentes de uma usina hidrelétrica são:

b.1) barragem

Entende-se por barragem a estrutura transversal ao leito dos rios, que bloqueiam sua passagem e tem como função basicamente represar a água formando um reservatório, permitindo a captação da água e elevando o nível da água para formar queda, regularizar vazões e amortecer golpes de aríete.

Existem diversos tipos de barragem, e a literatura possui inúmeras considerações a respeito de seu projeto, materiais, métodos construtivos, etc. Segundo SCHREIBER (1978) as barragens podem ser classificadas segundo seu material de construção em barragens de terra, de enrocamento (pedaços de rocha), de concreto ou ainda mistas (trechos de concreto e trechos de terra e/ou enrocamento). No Anexo 1- Usinas Hidrelétricas do Brasil, pode ser encontrada a relação das usinas hidrelétricas em operação no Brasil no ano de 2001, com a indicação do tipo de barragem e demais características construtivas de cada uma. Cabe dizer que no Brasil percebe-se que o tipo dominante de barragem é o de terra e enrocamento, devido às características de relevo do país, que tornam esta opção mais econômica.

A seguir, cada um dos principais tipos de barragem é apresentado.

b.1.1) barragens de terra e enrocamento

Entende-se por terra o solo superficial, constituído de rochas decompostas e sedimentos e por enrocamento as rochas de maiores dimensões. Embora trate-se de dois tipos distintos de materiais, estes dois tipos de barragens possuem a mesma concepção: o uso de materiais disponíveis próximos aos locais da obra e a colocação e compactação destes em diversas zonas do perfil (SCHREIBER, 1978).

As barragens de terra podem ser homogêneas (material de mesma característica em todo o perfil) ou zoneadas (separação do solo para constituição de diversas camadas, ou zonas). Em geral a maioria das barragens de terra possui uma camada de enrocamento no talude de montante (lado em contato com o reservatório), denominada rip-rap, que tem como função proteger a barragem da erosão. Para os

taludes de jusante, expostos a chuvas, ventos e outros agentes erosivos, costuma-se empregar uma proteção de grama ou bermas.

Este tipo de barragem não exige tipo especial de fundação (SCHREIBER, 1978), e em geral é dotado de filtros de areia ou enrocamento, para evitar problemas de infiltração de água (MASSAD, 2001).

b.1.2) barragens de concreto

As barragens de concreto podem ser de diversos tipos, sendo os principais descritos a seguir:

- barragem de gravidade: Denomina-se por barragem de gravidade toda aquela cuja estabilidade é garantida por seu peso próprio (SCHREIBER, 1978). Também conhecidas como barragens de “concreto massa” (MASSAD, 2001), possuem um perfil transversal triangular com uma construção retangular no seu topo, a crista da barragem.
- barragem de gravidade aliviada: São simplificações do caso anterior com vistas à redução do volume empregado de concreto, considerando que em muitos pontos da estrutura as solicitações são muito menos intensas do que a resistência do concreto aplicado. Busca-se desta forma configurações de seção transversal mais econômicas (SCHREIBER, 1978).
- barragem de abóbadas (ou arco): São uma configuração onde há uma ligeira curvatura em planta, não só por necessidades da topografia, mas principalmente para criar uma distribuição de tensões tangenciais, permitindo redução na quantidade de concreto usada. Além de excelentes condições da rocha de fundação, exige um formato topográfico específico no vale (SCHREIBER, 1978).
- barragem de contrafortes: São barragens dotadas de contrafortes perpendiculares ao eixo da barragem, que tem como função o suporte de parte dos esforços. Em geral são de construção mais complexa e maior custo que os outros tipos, e têm sido cada vez menos utilizadas no mundo em favor das de gravidade aliviada (SCHREIBER, 1978).

Um aspecto relevante na escolha do tipo de barragem é seu custo. Apenas como ilustração, a Tabela 3.01 apresenta uma noção dos custos relativos de alguns destes tipos (MASSAD, 2001).

Tabela 3.01: Custo relativo entre tipos de barragens (Massad, 2001)

Tipo de Barragem	Base/Altura (adimensional)	Volume / Altura (m³/m)	Custo relativo
Terra	5,5	2,75	1,0
Enrocamento	3,7	1,8	2,0
Concreto Gravidade	0,8	0,4	9,0

Como se pode notar o custo de uma barragem de concreto é quase uma ordem de grandeza maior do que uma de terra, e portanto para barragens de grande extensão deve-se considerar cuidadosamente a possibilidade do uso deste último tipo de material. Como pode ser visto no Anexo A, no Brasil quase todas as grandes obras hidrelétricas possuem ao menos uma parte de suas barragens em terra e/ou enrocamento (SCHREIBER, 1978).

b.2) reservatório

Reservatórios são os lagos artificiais formados em função do represamento do rio. Suas dimensões dependem do tipo da usina, da topografia e do volume armazenado. Em função de seu propósito e das dimensões do reservatório, as usinas são classificadas em usinas de acumulação ou usinas de fio d'água. Usinas de acumulação são aquelas dotadas de reservatórios para garantir uma maior regularidade de vazão entre os períodos de cheias e estiagem, enquanto usinas a fio d'água são aquelas que dispõem de capacidade de armazenamento muito reduzida, em geral apenas da vazão do curso d'água, podendo eventualmente possuir um reservatório reduzido para uso em horas de pico.

b.3) extravasores

Os extravasores são dispositivos responsáveis por evitar o transbordamento do reservatório em caso de vazão excedente, permitindo sua passagem direto para jusante (REIS; SILVEIRA, 2000). Segundo SOUZA et al. (1983), podem ser tanto de superfície (vertedores) como de fundo, e em geral são dotados de um dissipador de energia, que impede que ocorram danos à estrutura devido à ação da água em queda (SCHREIBER, 1978). Existem diversos estudos sobre o formato dos vertedores e dissipadores de energia, mas a forma genérica destes consiste numa

rampa de concreto de baixa inclinação (em torno de 10%), dotada de uma bacia de dissipação no fundo do rio.

b.4) comportas e acessórios

Comportas são componentes que permitem isolar a água do sistema de geração, permitindo por exemplo a manutenção das máquinas (REIS; SILVEIRA, 2000). Há diversos tipos de comportas, sendo o mais comum no Brasil a de segmento, que consiste numa chapa curva de aço dotada de braços radiais (SCHREIBER, 1978).

Além das comportas e de seus mecanismos de acionamento, há ainda as comportas de emergência, conhecidas como *stop-logs*. Estes consistem em geral de diversos elementos independentes, cada qual formado por duas vigas de aço de perfil “I”, ligadas por uma chapa de aço vedante. Estes elementos correm numa ranhura vertical nos pilares da estrutura, vedada com apoios de borracha (SCHREIBER, 1978).

Os *stop-logs* são usados quando a comporta necessita de manutenção, ou em casos de emergência. Quando não utilizados são guardados pendurados sobre a ranhura, acima do nível d’água, sendo movimentados quando necessário por meio de um guindaste dotado de um dispositivo conhecido como viga pescadora.

b.5) tomada de água

Conforme SOUZA et al. (1983), as tomadas d’água são o ponto onde se inicia a condução da água entre o reservatório e as turbinas, conhecido com adução. A estrutura destas deve ser tal que impeça a entrada de corpos estranhos, danos ou obstruções ao duto, além de fechar a entrada d’água quando necessário (REIS; SILVEIRA, 2000).

As tomadas d’água em geral são equipadas com grades de proteção, comportas (e eventualmente *stop-logs*) e mecanismo de limpeza de grades (SOUZA et al., 1983).

b.6) órgãos adutores

Denomina-se por órgão adutor toda a estrutura utilizada para ligar a tomada d’água à turbina. Esta ligação pode ser efetuada por canais de superfície livre, tubulações, túneis sob pressão ou poços forçados. A escolha do tipo a ser utilizado depende da

usina e suas condições topográficas, uma vez que a barragem pode estar tanto junta como muito distante da tomada d'água (SCHREIBER, 1978).

A principal definição aqui necessária é a diferenciação entre condutos livres e forçados: diz-se que um conduto é forçado caso o escoamento se dê com a água à plena seção, podendo estar a alta ou baixa pressão (REIS; SILVEIRA, 2000).

b.7) chaminés de equilíbrio e câmaras de descarga

De acordo com SOUZA et al. (1983), por economia de custos busca-se fazer os condutos forçados o mais curtos possível. No entanto, para que as sobrepressões não afetem os condutos de baixa pressão devem-se promover descontinuidades nos dutos, que atuem como elementos de transição, denominados como chaminés de equilíbrio. Estas basicamente se constituem por construções verticais dispostas no ponto de transição, aberta ao ar livre. Conforme REIS; SILVEIRA (2000), a única diferença entre estas e as câmaras de descarga são características construtivas, que dependem do empreendimento.

Dependendo do caso estas estruturas podem ou não conter equipamentos auxiliares, como comportas, *stop-logs*, válvulas, etc (SCHREIBER, 1978).

b.8) casa de força

Denomina-se por casa de força o edifício responsável por abrigar as máquinas hidráulicas, geradores, painéis e outros equipamentos elétricos, denominados genericamente por equipamentos eletro-mecânicos (REIS; SILVEIRA, 2000). A localização desta e suas características construtivas dependem do projeto.

Os equipamentos eletro-mecânicos, que fazem parte da usina dependem novamente de diversas características. Não cabe aqui neste texto detalhar os diferentes tipos de turbinas, geradores e sistemas de controle e monitoramento.

c) Implantação de uma hidrelétrica

Para a continuidade da revisão bibliográfica foi realizada uma pesquisa sobre o processo de construção das usinas hidrelétricas. No entanto, percebeu-se que devido à diversidade construtiva destas é impossível generalizar um fluxograma de etapas das obras de uma hidrelétrica. Segundo SCHREIBER (1978) não se pode estabelecer

regras fixas para o planejamento das usinas, pois as condições topográficas, hidrográficas, econômicas e por vezes políticas variam para cada bacia hidrográfica. O mesmo autor afirma novamente este fato, quando mais adiante diz que pela variedade das condições do local da obra e das possibilidades da mesma não é possível estabelecer regras comuns a todos os casos.

Desta forma, decidiu-se que seria realizado apenas um breve levantamento das etapas genéricas da construção de uma usina, deixando o detalhamento dos processos construtivos para o momento em que se proceda a busca dos processos realizados especificamente para o modelo e sistema de produto a ser inventariado.

Muitas das informações obtidas são originárias de consultas a especialistas. Como há uma escassez de material introdutório sobre o tema, muitas dúvidas levantadas durante o estudo foram solucionadas através de duas entrevistas: uma primeira com o Eng. Mauro Rodrigues dos Santos, ex-engenheiro residente de diversas obras de hidrelétricas da CESP (SANTOS, 2001), e outra como professor da Escola Politécnica da USP, Dr. Kokei Uehara (UEHARA, 2002), reconhecido especialista mundial no desvio de rios.

De modo bastante conciso e genérico podemos dizer que a construção de uma hidrelétrica passa pelas seguintes etapas (muitas delas sendo realizadas em paralelo):

c.1) instalação do canteiro de obras e da vila residencial

Uma obra civil do porte da construção de uma usina hidrelétrica demanda grandes quantidades de materiais e mão de obra. Considerando que a maioria dos projetos, ao menos no Brasil, encontra-se em áreas afastadas dos principais núcleos urbanos, é necessário implementar próximo à obra condições de oferecimento da infra-estrutura para sua realização.

Estas instalações são divididas numa primeira análise em dois tipos; o chamado canteiro de obras e a vila residencial.

Em geral as instalações do canteiro de obras compreendem armazenagens de materiais de construção (terra, enrocamento, areia, cimento, etc), instalações de beneficiamento (de britas, areia, etc), usina de concreto, pátio de montagem de formas, pátio de armações, oficina de manutenção dos veículos, etc. Em geral estas instalações são montadas dentro da área que futuramente será ocupada pelo

reservatório, ao pé da barragem. Cada usina, em função de sua localização e planejamento, possui uma concepção própria de canteiro, podendo incluir equipamentos de porte e capacidade industrial.

Por sua vez a vila residencial compreende moradia para diversos níveis de trabalhadores, dentre operários, engenheiros, etc, e as necessárias estruturas para sua permanência no local, como escolas, centro de saúde, comércio, etc. Em geral se constituem de obras simples, padronizadas e seguem para cada empreendedor um padrão específico de critérios de projeto. Estas vilas tem como função não apenas alojar os operários, mas também funcionários mais graduados, que muitas vezes também são alocados por extensos períodos de tempo no local da obra.

Devido a sua localização, geralmente em locais ermos e distantes, as vilas devem possuir uma estrutura que dê suporte às atividades sociais e de sustento de sua população de modo independente de cidades próximas. Em geral instalam-se hospitais, supermercados, clubes, escolas, comércio entre outros empreendimentos, tendo em vista inclusive que muitos dos funcionários são casados e se deslocam com suas famílias.

Deve-se por último ressaltar que na maioria das vezes grande parte desta estrutura montada é posteriormente transferida ao município ou à iniciativa privada, sendo aproveitada pela população após o término das obras. Além disso, deve-se citar o problema do contingente de operários desmobilizado após o término das obras das usinas, que em diversos casos no Brasil se constituíram em verdadeiros “exércitos” de desempregados, que lá permaneceram por terem se fixado ao local por diversos motivos, porém sem perspectivas de ocupação profissional, o que acabou em muitos casos constituindo um passivo social da construção das usinas no Brasil.

c.2) desvio do rio

Conforme afirma THOMAS (1976), qualquer que seja o tipo de barragem, para sua construção em geral é necessário que se realize a secagem do terreno para inspeção geológica final, preparo da fundação e construção das estruturas civis.

NAKAZATO (1988) afirma que a criação deste recinto ensecado é feita com o uso de barragens provisórias, construídas com material obtido em locais próximos, denominadas ensecadeiras.

A função destas ensecadeiras é desviar o rio, total ou parcialmente, de modo a permitir a realização das obras. Para sua construção, em geral, o material (enrocamento, terra, rochas) é lançado no leito do rio, de forma a criar progressivamente uma barragem pelo seu empilhamento. Uma vez esta seja formada, pode-se realizar o desvio do rio, atividade para a qual existem basicamente duas abordagens distintas: o desvio em uma única fase e o desvio do rio em múltiplas fases. A seguir ambas são resumidamente apresentadas.

- desvio do rio em uma única fase: faz-se um canal de desvio, paralelo ao leito original do rio, lançando-se o material de uma ensecadeira (de montante) logo após a entrada do desvio, e o da outra (jusante) logo antes da saída, de forma a isolar a área onde será construída a barragem. Uma vez isolada, esta área pode ser ensecada com o uso de bombas que retiram a água de seu interior. A Figura 3.03 a seguir ilustra o processo.

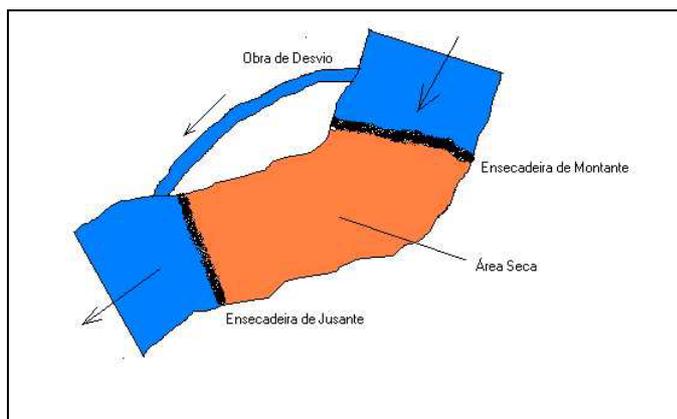


Figura 3.03: Desvio de rio em uma única fase(adaptado de NAKAZATO, 1988)

- desvio do rio em múltiplas fases: ao invés de desviar toda a vazão do rio por uma canal, faz-se um estrangulamento do mesmo em seu leito, ensecando primeiro uma parte e depois a outra. A Figura 3.04 abaixo ilustra este procedimento:

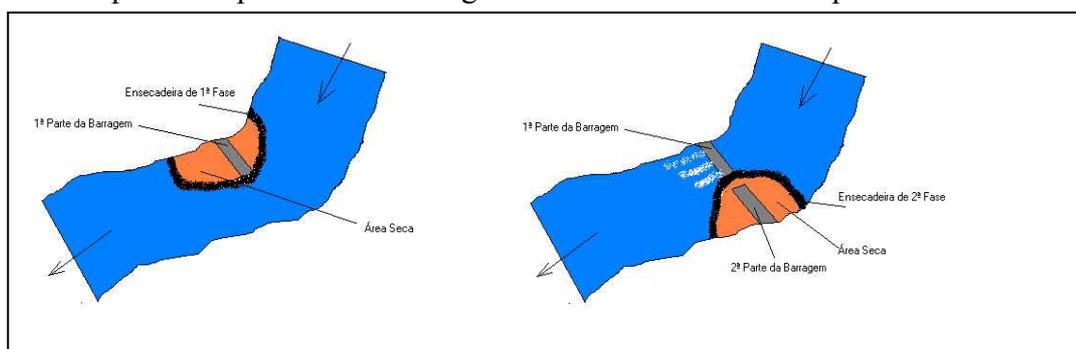


Figura 3.04: Desvio do rio em duas fases (adaptado de NAKAZATO, 1988)

Há que se considerar que ainda há uma outra possibilidade, a construção acima do leito. Pouco comum, esta significa construir a usina na margem do rio, com perda de cota por não estar no leito.

c.3) preparação do solo

Uma vez que o recinto de construção encontra-se ensecado é necessário que se realizem estudos geológicos finais, inspeções e tratamento das fundações da barragem (THOMAS, 1976). O tipo de tratamento das fundações vai depender do tipo e das características tanto da barragem como do solo e sub-solo do local.

Em geral barragens de terra e enrocamento não necessitam de condições especiais, bastando a retirada das camadas superficiais do solo. Mas barragens de concreto, segundo THOMAS (1976), necessitam uma avaliação tanto das condições do solo de suportar a carga da barragem como do efeito de permeabilidade de água sob a pressão do reservatório nas fundações. Nestes casos deve haver a escavação do solo até a rocha sã, de modo a apoiar a estrutura da barragem. Em diversos casos há ainda a necessidade de se realizar um tratamento corretivo, como por exemplo utilizando injeções de concreto.

c.4) escavações

Na obra de uma usina são comuns diversas escavações, em função das características construtivas da mesma e da topografia da região. Podem, além da escavação necessária para criação do canal de desvio, haver outras escavações como por exemplo o preparo das fundações para a construção de barragens de concreto e da casa de força.

Basicamente podem-se dividir as escavações em três classes: comuns, em rocha e submersas. As escavações comuns são aquelas realizadas em terra, com o uso de dragas, escavadeiras, pás carregadeiras e caminhões, além de outros equipamentos mais específicos (GAIOTO, 2001). Já as escavações em rocha são aquelas realizadas com explosivos, adicionalmente aos equipamentos tradicionais da construção civil. Já as submersas, como o próprio nome indica, são realizadas abaixo do nível d'água e são menos comuns.

c.5) construção da barragem e demais estruturas

Obviamente esta etapa depende do tipo de barragem que se pretende construir. As barragens de terra e enrocamento segundo GAIOTO (2001) seguem uma seqüência bastante simples de construção:

- 1 escavação do solo;
- 2 transporte do material;
- 3 espalhamento do material;
- 4 separação dos materiais;
- 5 correção da umidade;
- 6 homogeneização;
- 7 compactação;

Como se pode ver estas operações são bastante simples, embora trabalhosas em função dos volumes de materiais a serem movidos. Não envolvem estruturas auxiliares complexas e utilizam apenas máquinas de movimentação de terra, como caminhões, escavadeiras, etc.

Já a construção das estruturas de concreto é mais complexa. Tanto as barragens como a estrutura da casa de força demandam a implantação de um canteiro de obras capaz de fornecer materiais (britas, areia, concreto, armação, etc), além da operação de colocação do concreto, que demanda a construção de formas e muitas vezes consiste em um processo que necessita de constante controle. Há neste caso demanda por grande quantidade de equipamentos, mão de obra e monitoramento e controles de qualidade constantes.

c.6) montagem dos equipamentos eletro-mecânicos

Uma vez terminada a parte civil da obra (ou muitas vezes ainda durante sua realização), procede-se à montagem dos equipamentos na casa de força. A montagem de pontes rolantes, turbinas, geradores, transformadores, painéis e outros componentes pode ser uma tarefa bastante complexa, e em função do tamanho dos equipamentos muitas vezes estes chegam à usina em partes, necessitando de montagens *in situ*.

c.7) limpeza da área do reservatório

Antes de encher o reservatório deve-se retirar o máximo possível da vegetação da área a ser alagada. Raramente esta providência é realizada de forma completa, principalmente em zonas de incidência de vegetação mais exuberante, como a região amazônica.

A retirada incompleta da vegetação resulta na degradação de parte da biomassa quando alagada, o que como veremos provoca impactos ambientais importantes como a emissão de gases de efeito estufa e a acidificação da água.

c.8) enchimento do reservatório

Concluída a obra, inicia-se a fase de enchimento do reservatório, que pode demorar meses para estar cheio. Deve-se ter especial atenção ao comportamento do solo e das estruturas nesta fase, de modo a detectar quaisquer anomalias.

3.2.2 Impacto Ambiental de Usinas Hidrelétricas

A implantação de uma usina hidrelétrica, principalmente a etapa de formação do reservatório, consiste numa obra de engenharia que provoca extensas alterações no meio natural. A própria ELETROBRÁS (1986) reconhece que estes empreendimentos alteram o meio ambiente regional, afetando ecossistemas, condições sociais, econômicas e culturais.

Atualmente existe extensa literatura a respeito dos impactos ambientais e sociais das usinas hidrelétricas, tratando desde efeitos sobre populações indígenas até impactos de contribuição ao aquecimento global, passando pelo alagamento de sítios arqueológicos e alteração nas populações aquáticas.

Para os fins desta pesquisa no entanto deve-se antes de tudo ter em mente que não serão tratados impactos ambientais, e sim aspectos ambientais, das usinas hidrelétricas. Esta observação é importante pois a quase totalidade dos impactos ambientais em geral atribuídos às hidrelétricas são provocados por um único aspecto ambiental, a modificação do uso do solo pelo alagamento da área do reservatório.

Deve-se neste ponto ter-se em mente a limitação da metodologia de ACV que em seu atual estágio de desenvolvimento trabalha apenas com fluxos de matéria e energia, não sendo ainda capaz de lidar com alterações no espaço físico ou impactos sociais.

Os dois fatores acima apontados denotam uma característica muito importante deste estudo: sua abordagem, embora distinta das atualmente em uso pela consideração de consumos de recursos naturais e emissão de rejeitos ao longo de todo o ciclo de vida, é limitada na consideração de problemas reconhecidamente fundamentais da geração hidrelétrica. Este fato faz com que nos lembremos de que a ACV não deve ser tomada como substituta dos métodos atuais de avaliação de impactos, sendo uma ferramenta complementar a ser utilizada neste processo.

Desta forma, o presente projeto não tem portanto o objetivo de colaborar na discussão dos impactos sócio-ambientais das usinas (para a qual já existem diversas referências e grupos de pesquisa trabalhando) e sim apenas busca inventariar os aspectos quantificáveis do ciclo de vida das hidrelétricas.

Dada no entanto a importância de situar o trabalho dentro do contexto atual de pesquisa sobre as usinas, considerou-se que seria de grande importância uma revisão genérica sobre os impactos ambientais das usinas hidrelétricas.

Na verdade, verificou-se que cada autor, entidade ou instituição identifica os impactos das hidrelétricas a seu modo, classificando-os segundo seus critérios. De modo a apresentar uma visão geral destes impactos consultou-se algumas referências tidas como representativas (ABBASI et al., 2001; BRASIL, 2001; CESP, 1990; DUARTE, 2000; ELETROBRAS, 1983, 1986; ESPANHA, 1989; MAGRINI, 1994; PRICE; PROBERT, 1997; RASHAD, ISMAIL, 2000; THEMAG, 2001; WCD, 2000), e elaborou-se uma relação consolidada dos impactos sócio-ambientais das usinas hidrelétricas, que se encontra no Anexo B- Impacto ambiental de usinas hidrelétricas.

Sintetizando as posições das referências citadas acima, pode-se dizer que a implantação de uma usina hidrelétrica resulta em impactos tanto no meio físico (ar, água e solo), como no meio biótico (fauna e flora) e no meio social (economia, ocupação do espaço, paisagismo, estrutura social, relações interpessoais e cultura), sendo portanto uma atividade que exige grande cuidado em seu planejamento e extensa discussão pública com os diversos atores sociais envolvidos.

Uma das instituições internacionais que se dedicam a estudar as barragens e seus efeitos é a WCD- *World Commission on Dams*. Esta entidade publicou recentemente um relatório (WCD, 2000) onde divide seus estudos em duas vertentes: desempenho

social e desempenho ambiental. Para o desempenho ambiental, afirma que os impactos das usinas são classificados em três categorias:

- impactos de primeira ordem: são as conseqüências físicas, químicas e geomorfológicas do barramento do rio e a alteração do regime hídrico;
- impactos de segunda ordem: mudanças na produtividade biológica primária dos ecossistemas;
- impactos de terceira ordem: alterações na fauna (principalmente peixes) derivadas dos impactos de primeira ou segunda ordem.

Esta divisão é bastante interessante do ponto de vista deste estudo, pois apresenta uma relação de causa-efeito, não necessariamente linear nem unívoca, entre as conseqüências imediatas dos aspectos ambientais do empreendimento, os impactos de primeira ordem e os demais impactos identificados.

Por outro lado, pensando em termos das fases de desenvolvimento de uma usina, o governo espanhol publicou um guia (ESPANHA, 1989), onde se levantam os seguintes pontos a serem investigados numa avaliação de impactos como fontes de impactos:

- fase de construção:
 - desvio do rio;
 - criação de vias de acesso;
 - obra civil da construção, principalmente trânsito de máquinas;
 - transporte de materiais para e da obra da usina;
 - despejo de terra e resíduos da construção;
 - edifícios temporários da obra;
 - desmatamento da área a ser inundada;
 - áreas de empréstimo;
 - impactos sócio-econômicos;
- fase de uso:
 - represamento da água;
 - infra-estrutura (funcionamento de escritórios, moradias, etc);
 - oscilação do nível d'água;
 - vazão a jusante;
 - impactos socio-econômicos;

- fase de descomissionamento.

Esta divisão do estudo da usina em fases é essencial na aplicação da metodologia da ACV, e certamente deve-se considerar a dimensão temporal da usina, ou seja, sua construção e operação. Quanto ao abandono de usinas hidrelétricas, há poucos casos conhecidos, sendo a maioria de antigas pequenas centrais. Embora muitas barragens estejam se aproximando do final de sua vida útil há a possibilidade de renovar equipamentos eletro-mecânicos e reparar estruturas civis, conforme afirma SÁNCHEZ (2001). Segundo o autor algumas pequenas barragens foram demolidas nos EUA e Canadá, mas no Brasil ainda não se dispõe de nenhum caso. Na mesma referência ainda é feito um alerta de que no momento dos projetos deste tipo de empreendimento a desativação não é considerada, o que futuramente pode constituir num risco.

Uma outra referência que aborda este aspecto temporal dos impactos das usinas é a abordagem feita por MAGRINI (1994), a qual, ao apresentar a primeira etapa de uma proposta de metodologia de avaliação de impactos, coloca que pode haver dois tipos de caráter nas ações geradoras de impactos: ações temporais e espaciais. O caráter espacial das ações remete à área de influência do empreendimento, enquanto o temporal diz respeito às fases citadas do mesmo. Segundo a autora as ações impactantes podem ser divididas em três momentos: implantação do canteiro, construção da barragem e operação da usina.

3.2.3 Hidrelétricas e a matriz energética brasileira

Esta parte da revisão bibliográfica teve o propósito de levantar dados para a definição do sistema de produto a ser estudado, por meio de verificação da composição da matriz energética nacional e das características das usinas brasileiras.

Para este objetivo foram consultados os órgãos oficiais do setor elétrico: ELETROBRÁS, ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica, ONS- Operador Nacional do Sistema, e o MME- Ministério das Minas e Energia. Uma vez que em função das crises do setor elétrico os anos de 2001 e 2002 foram atípicos para o setor elétrico, decidiu-se trabalhar com dados de 2000.

a) Eletricidade na matriz energética brasileira

A primeira pesquisa realizada nesta etapa do estudo diz respeito a importância da eletricidade na matriz energética nacional. Para tanto, verificou-se qual o consumo de energia e de eletricidade para os diversos setores econômicos através do Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2001). Na Tabela 3.02 temos apresentados estes dados, referentes ao ano de 2000.

Tabela 3. 02: Consumo energético e elétrico por setor¹, 2000 (BRASIL, 2001).

SETOR	Consumo Total (mil tep)	Consumo de Eletricidade	
		(mil tep)	% do consumo total
Energético	14.202	3.072	21,6
Comercial	14.605	13.757	94,2
Público	9.512	8.636	90,5
Residencial	37.728	24.213	64,2
Agropecuário	9.713	3.850	39,6
Transportes	46.430	367	0,8
Industrial	89.725	42.288	47,1
TOTAL	258.048	103.270	40,0

Os dados da Tabela 3.02 permitem verificar a importância da eletricidade na matriz energética brasileira, principalmente nos setores comercial, público, residencial e industrial. Nos demais setores, como transporte, agropecuário e energético, esta participação é menor devido ao uso de combustíveis fósseis.

Embora não permita nenhuma inferência para o estabelecimento do modelo a ser estudado, esta constatação subsidia a justificativa de realização deste trabalho, por ressaltar a importância da eletricidade na matriz energética brasileira. Quanto a este aspecto, é importante salientar o alto consumo industrial e residencial, o que demonstra que esta é utilizada em diversos processos que participam de ciclos de vida de produtos, reforçando a justificativa da escolha desta forma de energia para o projeto piloto de elaboração de bases de dados para ACV no Brasil.

b) Hidreletricidade na matriz elétrica brasileira

Uma vez constatada a presença e a importância da eletricidade na matriz energética nacional, deve-se verificar a distribuição desta geração por fonte. Novamente

¹ Valores calculados com o fator de conversão de 0,29 tep/ MWh (BRASIL, 2001). Atualmente adota-se o valor de 0,08 tep/ MWh, o que modifica significativamente os valores da tabela e os respectivos percentuais. Para maiores detalhes, ver a nova edição do documento (BRASIL, 2003). Esta alteração no entanto não modifica o fato da eletricidade possuir grande importância no cenário energético brasileiro.

segundo BRASIL (2001) temos que para os 347.733 GWh gerados em 2000, 293.265 GWh são provenientes de hidrelétricas, somando as chamadas “centrais elétricas hidráulicas auto-produtoras” (6.222 GWh) e das “centrais elétricas hidráulicas de serviço público” (287.043 GWh). Desta forma, segundo estes dados, 84,3% da eletricidade gerada no país em 2000 era de origem hidrelétrica.

Deve-se ainda considerar que nestes cálculos considera-se a usina de Itaipu com apenas metade de sua potência dedicada à geração brasileira, sendo que na verdade segundo dados da empresa (ITAIPU BINACIONAL, 2002), no ano de 2000, 93,1% da produção da usina foram destinados ao Brasil. Considerando que segundo a empresa (ITAIPU BINACIONAL, 2002) no ano de 2000 a usina gerou 93.428 GWh, se considerarmos 93,1% da energia produzida pela usina, ao invés de 50%, na geração brasileira, temos que a contribuição das hidrelétricas na geração de eletricidade no Brasil no ano de 2000 é de 86,0%, e de modo mais específico pode-se afirmar que no ano de 2000 22,4% da eletricidade produzida no país foi gerada na usina de Itaipu.

Apenas para ilustrar este predomínio da alternativa hidráulica, complementando os valores apresentados, verificou-se junto à ANEEL os dados de geração de eletricidade no país para o ano de 2000. No entanto, mesmo mediante solicitação específica a agência não forneceu os dados por energia gerada, e desta forma apresentam-se aqui apenas os dados por potência instalada, o que pode indicar, mas não determinar, a predominância de uma ou outra forma de geração. No entanto devemos lembrar que no Brasil as usinas hidrelétricas apresentam em geral altos fatores de capacidade e rendimentos, o que faz com que sua contribuição em termos de energia gerada seja maior ainda que a contribuição pela potência instalada, o que faz com que a estimativa aqui apresentada possa ser considerada conservadora.

Segundo a ANEEL (ANEEL, 2002), atualmente a distribuição da potência elétrica instalada no Brasil é a apresentada na Tabela 3.03, a seguir.

Tabela 3.03: Potência Elétrica Instalada em 2000 (ANEEL, 2002)

Alternativa	Nº de instalações	Potência Instalada (kW)	%
Hidrelétrica	134	62.063.752	81,75
Termelétrica	614	11.006.848	14,50
Eólica	7	21.200	0,03
Nuclear	2	1.966.000	2,59
PCH	313	861.271	1,13
TOTAL	1.070	75.919.071	

Apenas como ressalva, deve-se notar a separação das usinas em hidrelétricas e das PCHs- Pequenas Centrais Hidrelétricas. Estas pequenas centrais são igualmente unidades hidrelétricas, porém são separadas por serem de menores dimensões, com potência entre 1 e 30 MW e área de reservatório menor ou igual à 3 km² (ANEEL, 2002).

Como esperado, os dados da Tabela 3.03 apresentam a predominância da geração hidrelétrica quanto à potência instalada, e embora esta informação não seja utilizada diretamente serve de suporte à afirmação anterior sobre a escolha desta alternativa para o estudo.

c) Caracterização do parque hidrelétrico brasileiro

Com a finalidade de subsidiar a definição do modelo a ser estudado foi realizado um levantamento das usinas hidrelétricas em operação no Brasil. Como não eram disponíveis dados de 2000, optou-se por trabalhar com dados de 2001. Este procedimento não deve prejudicar os resultados do estudo, uma vez que esta avaliação é meramente qualitativa e seus resultados é que irão balizar o levantamento quantitativo de dados.

Desta forma, realizou-se uma consulta ao banco de dados da ANEEL (ANEEL, 2001) para conhecimento das usinas em operação no país. Segundo a agência, temos que ao final de 2001, incluindo todas as alternativas de geração, o Brasil possuía 1.273 usinas de eletricidade, sendo que 1.029 estavam em operação. Deste total, 130 usinas eram hidrelétricas (não contando as PCHs), responsáveis por 61.176 MW da potência instalada (82,26% do total).

De modo a permitir uma melhor caracterização das usinas, buscou-se junto às entidades do setor e bibliografias especializadas as características técnicas de cada uma destas instalações. Ademais dos dados da ANEEL (ANEEL, 2001) e da ONS (ONS, 2001), uma referência importante neste sentido foi o livro “100 Barragens Brasileiras” (CRUZ, 1996), que foi utilizado como base para a posterior atualização, com dados obtidos no “Registro de Barragens do Brasil”, elaborado pelo CBDB- Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2002). De modo a não prejudicar a leitura do texto, a tabela com os dados obtidos nesta pesquisa é apresentada no Anexo 1- Usinas hidrelétricas do Brasil.

3.3 Uso da ACV em sistemas energéticos

Uma vez realizada a pesquisa bibliográfica sobre a metodologia a ser empregada (ACV) e o objeto de estudo (usinas hidrelétricas), procedeu-se ao levantamento dos estudos sobre as experiências de aplicação da metodologia ao objeto de estudo.

Durante este levantamento verificou-se que sobre a aplicação da ACV em usinas hidrelétricas existe material muito escasso. No Brasil não foi encontrado nenhum estudo semelhante publicado, e mesmo internacionalmente a bibliografia sobre o tema é muito limitada, sendo inclusive o tema de aplicação da ACV em sistemas de energia um dos aspectos ainda em discussão pela comunidade internacional da área. Cabe citar aqui que em âmbito nacional existem dois trabalhos de mestrado anteriores a este que abordam o assunto (CARVALHO, 2000; MARTINS, 1999), mas que abordam apenas conceitualmente a importância e as aplicações da ACV em sistemas de energia, sem no entanto aplicar a metodologia.

Este fato levou à realização de um estudo em paralelo, dedicado ao propósito de identificar e estudar as experiências de iniciativas internacionais semelhantes, realizado concomitantemente a este trabalho, e publicado como monografia de conclusão de um curso de especialização (RIBEIRO, 2003). Este trabalho traz detalhes dos principais estudos encontrados e seus pontos principais serão aqui resumidos. Para descrição e detalhes dos trabalhos citados, recomenda-se a leitura dos mesmos na íntegra.

3.3.1 Conceito de sistema energético

De acordo com SØRENSEN (1992), entende-se por sistema energético o completo sistema para gerar, suprir e usar a energia num dado contexto. Esta definição é apresentada da mesma forma em MARTINS (1999), que considera um sistema energético como o ciclo completo de geração, distribuição e uso da energia inserido dentro de um contexto social.

Esta definição inclui o conceito de que os sistemas não são apenas um conjunto de elementos, mas agregam as relações entre estes para que se cumpra uma função. No caso dos sistemas energéticos, esta conceituação é bastante pertinente, visto que há uma função a ser cumprida, de oferecimento de um serviço energético, também

conhecidos como *uso final*. Estes serviços energéticos são o resultado de uma combinação de diversas tecnologias, infra-estruturas, capital, trabalho, conhecimento, materiais e energia (UNEP, 2000), e podem ser iluminação, aquecimento, resfriamento, movimentação de cargas, etc.

Para congregarmos estes fatores e fornecer o serviço, deve existir o que se denomina *cadeia energética*, conjunto de atividades que se inicia na extração ou coleta da energia primária que, através de muitos passos, é convertida em vetores energéticos, usados nos equipamentos de uso final para fornecer o serviço energético em questão (GOLDEMBERG, 1998). A Figura 3.05 a seguir ilustra este conceito.

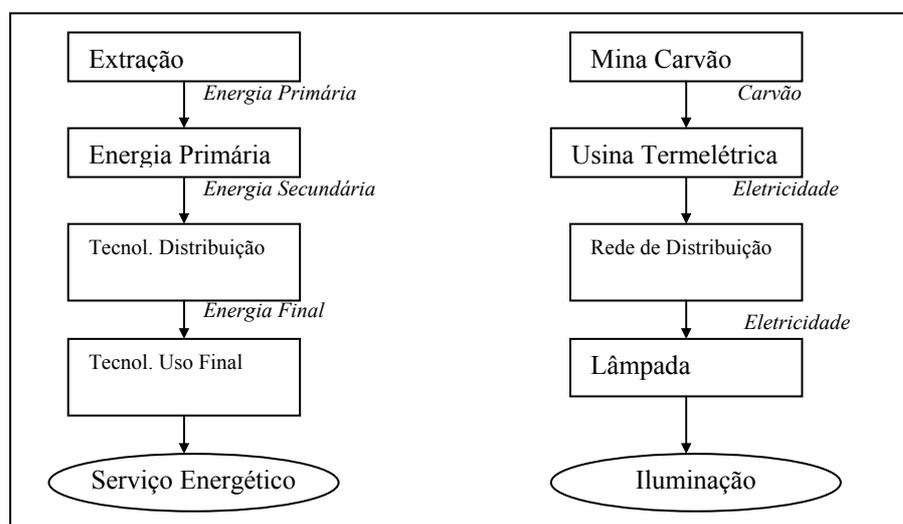


Figura 3.05: A Cadeia Energética Genérica (GOLDEMBERG, 1998)

Fisicamente, segundo SØRENSEN (1992), o sistema energético compõe-se de instalações para extrair, coletar ou importar energia, tratar os energéticos (como uma refinaria, por exemplo), converter a energia em formas intermediárias (como uma usina termelétrica, por exemplo), sistema de transporte e fornecimento do serviço (como um equipamento de uso final). Conforme MARTINS (1999), estes itens podem ser expressos como as estruturas necessárias para a extração, importação ou coleta do energético primário, seu tratamento e as sucessivas conversões até a prestação do serviço energético.

3.3.2 ACV e sistemas energéticos

Como visto na revisão bibliográfica de ACV, historicamente os primeiros usos da metodologia tinham incluídos nas fronteiras o consumo energético. No entanto até hoje muitas questões sobre o uso desta ferramenta neste tipo de processo ainda são controversas.

Buscando responder a algumas destas indefinições, foram levantadas informações de dois eventos realizados pela comunidade científica e empresarial ligada à área. O primeiro, mais genérico, foi o *Expert Workshop on Life Cycle Analysis of Energy Systems*, realizado pela OECD- *Organization for Economic Cooperation and Development*, em 1992 (OECD, 1992). O segundo foi um seminário promovido pelo órgão governamental de meio ambiente dos Estados Unidos, a EPA- *Environmental Protection Agency*, com a colaboração de vários especialistas (ESTADOS UNIDOS, 2001). Estes documentos são a base das discussões aqui desenvolvidas.

Antes de tratar do uso propriamente dito da ACV nos sistemas de energia, cabe fazer uma primeira constatação, sobre os motivos desta dificuldade em estabelecer critérios e padrões comuns de avaliação. Segundo as discussões apresentadas no seminário da EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001) sucede que os sistemas de suprimento de eletricidade estão entre os mais complexos dentre os setores avaliados pela ACV, devido aos alguns motivos, dentre os quais se pode citar os seguintes (ESTADOS UNIDOS, 2001):

- extensa abrangência geográfica dos sistemas;
- grandes variações sazonais (e até diárias) nos despachos de energia;
- diferenças significativas de instalações, consumos e emissões entre fontes energéticas distintas, e mesmo entre usinas de mesmo tipo de geração;
- rápida evolução tecnológica e variações regionais de acordo tanto com o ambiente regulatório do setor elétrico como com a tecnologia utilizada;
- horizontes de análise extensos, e
- grande importância do consumo de eletricidade nos ciclos de vida de produtos.

Uma vez admitida esta complexidade, e as suas possíveis implicações em termos de limitação dos estudos, pode-se abordar a questão da importância da realização de

estudos de ACV em sistemas energéticos. Resumidamente, podemos dizer que esta se dá devido aos seguintes motivos (OECD, 1992):

- presentes em praticamente todas as atividades humanas;
- insumo essencial, sendo um módulo importante nos ciclos de vida de produtos e serviços;
- tanto a geração como o transporte de energia são grandes fontes de impacto ambiental;
- em geral, sistemas energéticos necessitam grandes obras e geram impactos ambientais em diversos níveis;
- seu planejamento inclui um grande número de tomada de decisões, o que demanda informações (inclusive ambientais), e
- cada país ou região tem diferentes fontes e matrizes energéticas, não permitindo o uso de bases de outras localidades.

Esta argumentação pode ser resumida na afirmação do evento da EPA, na qual se diz que o uso da eletricidade especificamente apresenta importantes contribuições aos resultados das ACVs para a maioria dos produtos. Desta forma, conclui o trabalho, a disponibilização de bases de dados públicas da geração de eletricidade traz inúmeros benefícios, tanto para aqueles que realizam estudos de ACV de produtos como para aqueles que tomam decisões baseados na ACV (ESTADOS UNIDOS, 2001). Estas afirmações novamente vem reforçar as justificativas para a realização deste trabalho. Quanto aos objetivos e aplicações da ACV de sistemas energéticos, apresentam-se maiores detalhes no evento da OECD (OECD, 1992), onde se colocam os seguintes objetivos possíveis para uma ACV de sistemas energéticos:

- avaliação do impactos a longo prazo de diferentes tecnologias e estratégias;
- identificação de oportunidades de prevenção à poluição;
- identificação de áreas prioritárias para pesquisa e políticas para desenvolvimento;
- definição de áreas de cooperação entre os países membros;
- coordenação de esforços para solução de problemas regionais e globais, e
- busca de cooperação internacional para otimizar o uso de recursos naturais.

Estes estudos, segundo a entidade (OECD, 1992), têm como meta estabelecer o uso da ACV para:

- banco de dados referentes ao módulo de geração de energia para outras ACVs;
- otimização ambiental de processos;
- marketing das empresas, principalmente geradoras de energia em mercados competitivos;
- planejamento de recursos energéticos (principalmente no contexto do planejamento integrado de recursos), e
- internalização de externalidades (através do uso de mecanismos de monetarização após a ACV).

De modo mais sucinto, estes usos acima indicados podem ser resumidos em dois tipos: estudos para incorporar dados em outras ACVs e estudos para avaliar os sistemas energéticos em si.

Esta posição é defendida no relatório do evento da EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001), onde se afirma que os estudos de ACV de sistemas energéticos podem ser classificados entre aqueles realizados para incorporação em outras ACVs e aqueles desenvolvidos para suportar tomadas de decisão nos sistemas em si. No relatório principal do evento esta distinção é feita estabelecendo dois tipos de modelo: o atribucional e o consequencial. As principais características de cada tipo são (ESTADOS UNIDOS, 2001):

- ICVs atribucionais: buscam responder à questões do tipo “como os fluxos (de recursos, emissões e trocas entre sistemas) ocorrem ao longo do tempo”, e servem para alocar a cada produto porções dos consumos e emissões. Desta forma, no caso da eletricidade, servem para alimentar ACV de produtos que utilizam desta forma de energia em seus ciclos de vida;
- ICVs consequenciais: buscam responder “como os fluxos variam em função de decisões”, e servem para avaliar o sistema em estudo *per se*, e desta forma tomar decisões sobre o sistema. No caso dos sistemas energéticos, serviriam, por exemplo, para o planejamento da geração.

3.3.3 Considerações sobre o escopo de sistemas energéticos em ACV

Conforme já dito, a metodologia da ACV ainda possui diversas áreas onde há necessidade de desenvolvimento metodológico. No caso dos sistemas energéticos, devido às suas características inerentes já apontadas, há uma grande dificuldade em estabelecer um consenso sobre uma abordagem comum e válida a todas as formas de geração de energia.

Um primeiro ponto relevante neste sentido diz respeito à função a ser estudada. Conforme expresso na síntese do evento da OECD (OECD, 1992), para comparar sistemas energéticos (abordagem consequencial) é preferível trabalhar em termos de serviço energético prestado ao invés de energia produzida, uma vez que podem haver diferentes maneiras de se executar o serviço. No entanto, para criar bancos de dados de sistemas energéticos (abordagem atribucional) faz-se necessário que se desenvolvam análises sobre a função de gerar energia, com o que concorda CARVALHO (2000), que afirma que no caso da ACVs de sistemas energéticos, o produto é a energia.

Uma questão mais complexa envolve a definição de fronteiras. Estas definições dependem na verdade de cada estudo, e em muitos casos são realizadas em função da disponibilidade de dados.

A necessidade da determinação de fronteiras reside no fato de que, caso esta não se proceda, a inclusão da produção dos bens de capital pode levar o sistema a uma regressão interminável no espaço e no tempo, como assinalado por BAISSNÉE (1992). Para que o estudo possa se limitar a um número definido e viável de processos é necessário que se estabeleçam fronteiras, que de acordo com CURRAN (2001), dependem de escolhas em duas dimensões: fronteiras quanto aos aspectos ambientais e quanto aos processos da cadeia produtiva, ou segundo a nomenclatura empregada pela autora, quanto à dimensão espacial (diferentes etapas do ciclo de vida: extração de recursos, beneficiamento, transportes, manufatura, uso, descarte, etc), e dimensão temporal (construção, operação, manutenção, desativação, etc).

Quanto à dimensão temporal, KREWITT (2001) coloca que a ACV costuma limitar-se ao estudo dos impactos durante a operação do sistema, mas deixa de lado aqueles referentes às atividades de construção. No caso dos sistemas energéticos, principalmente no caso das fontes renováveis, conforme apresenta SETTERWALL

(2001), é usual que se inclua a fase de construção, produção de combustíveis, operação (incluindo substituição equipamentos e manuseio dos resíduos dos combustíveis) e a fase de demolição, exceto para hidrelétrica quando a demolição não ocorre, e nos estudos é substituída por manutenção e troca de equipamento.

Na opinião dos especialistas reunidos no evento da EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001), os impactos ambientais tanto de bens de consumo como de infra-estrutura devem ser incluídos na produção e construção dos sistemas energéticos. Deve-se no entanto considerar a posição de BRAAM (2001), para quem embora a princípio deva-se incluir nos estudos dos sistemas energéticos a construção e desativação da infra-estrutura, é importante manter em mente sua importância relativa, pois muitas vezes suas contribuições são insignificantes. De modo bastante particular para as fontes renováveis, principalmente hidrelétrica, eólica e solar, a etapa de construção das instalações e equipamentos é sem dúvida a mais impactante, segundo CURRAN (2001).

Especificamente sobre quais componentes da infra-estrutura devem ser considerados, o evento da EPA sobre o tema (ESTADOS UNIDOS, 2001) conclui que deve-se incluir estas nas fronteiras apenas quando houverem equipamentos, instalações ou obras construídas especificamente para o empreendimento, como por exemplo o material usado na fabricação de uma turbina. Já, por exemplo, o material usado para um guindaste usado na construção, e depois usado em outras obras, não deve ser computado.

Sobre este ponto, FRISCHKNECHT (2001) especifica que os equipamentos permanentes são claramente importantes nas ACVs de energias renováveis, e não devem ser desprezados de estudos de hidrelétricas.

Uma outra colocação importante de KREWITT (2001) é que os impactos da manutenção e reparo das instalações em geral são muito baixos, e não devem ser considerados. Esta posição no entanto não é compartilhada por VIRTANEN; LUBKERT (2001), que são mais enfáticos, ao afirmarem que quando se realiza uma ACV de sistemas energéticos, este tipo de aspecto adquire enorme importância e portanto devem ser igualmente considerados. Por exemplo, os impactos da manufatura, manutenção e desativação das instalações e infra-estrutura necessária são de grande importância na avaliação das diferentes tecnologias. Desta forma, sob

este ponto é mais adequado manter a perspectiva mais conservadora, e manter nas fronteiras as operações de manutenção realizadas.

Segundo SETTERWALL (2001), os dados da construção são obtidos para os principais materiais de construção empregados, e seu transporte. A fabricação dos componentes não é levada em conta, mas a manufatura dos materiais para sua fabricação sim. Esta hipótese parece ser compartilhada pelos demais especialistas no assunto, não tendo sido contestada em nenhum ponto do documento da EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001). Apenas para fins de exemplificação tem-se que, segundo o autor, os principais materiais neste caso são:

- aço;
- concreto;
- cobre;
- alumínio;
- outros metais;
- plásticos;
- rocha;
- madeira;
- obras de terra.

Estas considerações no entanto são fortemente dependentes da disponibilidade de dados. Conforme cita CURRAN (2001), a principal limitação na consideração de aspectos é esta disponibilidade e embora seja útil construir uma lista de referência cada caso possui sua disponibilidade particular que não pode ser negligenciada. Nestas situações, conforme indicado no relatório do seminário (ESTADOS UNIDOS, 2001), recomenda-se que quando houver ausência de dados deve-se realizar estimativas super-estimadas com auxílio de um especialista, incluindo sempre as hipóteses na documentação.

Outro aspecto importante, ressaltado no evento da EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001), refere-se ao impacto dos operários trabalhando nas etapas construtivas. Estes não devem ser incluídos, pois suas atividades cotidianas (como por exemplo a alimentação) seriam realizadas de qualquer modo. No entanto cabe neste caso uma exceção, em relação ao transporte destes para e do local de trabalho até suas residências ou alojamentos, que merece quantificação.

Sobre a operação dos sistemas energéticos, tem-se que uma dificuldade em realizar ICVs de energias renováveis se encontra nos valores comparativamente muito reduzidos de alguns aspectos da operação em relação a fontes fósseis. Como a maior parte de diversos aspectos ocorre na construção, surgem dois problemas: na operação

muitos aspectos assumem valores de traço ou nulos; além disso na construção tem-se dificuldade de alocar os aspectos na unidade funcional, em geral unidades de energia como o kWh, pois não se tem definido o período de funcionamento da usina (ESTADOS UNIDOS, 2001).

Neste sentido, SETTERWALL (2001) apresenta os impactos geralmente mais considerados na fase de operação das instalações, como sendo:

- uso de combustível;
- uso de produtos químicos;
- uso do solo;
- emissões do uso do combustível;
- radiação;
- emissões de gases de efeito estufa de áreas alagadas, e
- geração de resíduo, principalmente de combustíveis.

No entanto, segundo OVERCASH (2001), há outros aspectos freqüentemente relevantes, porém de difícil quantificação. Neste caso, recomenda-se ter um relatório a parte do ICV, comentando de modo qualitativo estes aspectos de cunho mais subjetivo (como alterações no uso da água), pois incluir estes no ICV constitui-se num desafio, uma vez que o ICV é uma ferramenta quantitativa.

Na verdade, como afirma KREWITT (2001), para as fontes renováveis os impactos ambientais mais relevantes provêm de aspectos ambientais diversos dos tradicionais, e as bases de dados devem ser flexíveis o suficiente para inclui-los. São exemplos os impactos sobre uso do solo, alteração de regimes hídricos, efeitos sobre ecossistemas, etc. Percebe-se, segundo o autor, que na verdade a ACV possui limitações para a avaliação de diversos impactos relevantes das fontes renováveis, como efeitos na biodiversidade e qualidade da água. Nestes casos há um problema de difícil solução principalmente na Avaliação de Impactos uma vez que os impactos dependem não apenas da magnitude do aspecto causador, mas em grande parte das condições do meio receptor (qualidade do solo, regime hídrico, alteração do microclima, topografia, etc).

Um exemplo de impacto deste tipo são as contribuições ao aquecimento global pela emissão dos gases de efeito estufa pelos reservatórios de hidrelétricas, que segundo FRISCHKNECHT (2001) não devem ser esquecidas. Este autor ressalta ainda que atualmente inexistem um tratamento adequado para os impactos nos ecossistemas

causados pela geração hidrelétrica, e não se tem certeza se um dia será possível que este seja obtido.

Ainda assim, diversas tentativas tem sido feitas no sentido de estabelecer também na operação da usina uma lista de aspectos mínimos a serem estudados. Neste sentido, segundo KREWITT (2001), o Projeto ExternE, uma das principais iniciativas de estudos desta natureza, iniciou seus trabalhos com uma avaliação geral de poluentes e seus impactos, usando em grande parte o conhecimento dos participantes para estabelecer uma relação de poluentes: gases de efeito estufa, NO_x, SO₂ e material particulado. Embora esta relação tenha sido criticada por sua reduzida extensão, estudos posteriores mais abrangentes demonstraram que estes realmente são os poluentes mais relevantes.

Mais recentemente, o evento da EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001) consolidou uma nova lista, a saber:

- recursos: água, combustível (“no solo”), minerais (“no solo”), biomassa extraída e uso do solo;
- emissões atmosféricas: CO₂, CO, MP, CH₄, SO_x, NO_x, Metais (Hg, Pb, etc), COV, dioxinas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), SF₆ e HFCs;
- efluentes líquidos: demanda química oxigênio (DQO), demanda bioquímica oxigênio (DBO), sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, temperatura, amônia, nitrogênio total, NO₃, NO₂, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), fosfato e metais (Cu, Ni, As, Cd, Cr, Pb, Hg);
- resíduos: resíduos sólidos, resíduos radioativos e resíduos perigosos;

Estes resultados no entanto, ressalta o documento, são orientativos, e não devem ser encarados como limitantes, devendo cada caso ser examinado em separado (ESTADOS UNIDOS, 2001).

Ainda sobre as definições há outros dois pontos de interesse cujas opiniões internacionais foram consolidadas no evento da EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001):

- sobre a definição de critérios de corte, decidiu-se que cabe a cada estudo estabelecer individualmente seus respectivos valores, que devem ser explícitos e bem descritos. Não se estabeleceu nenhuma orientação neste sentido.
- A respeito de alocação dos usos múltiplos do reservatório das usinas hidrelétricas, recomenda-se não incluir no estudo nenhum outro “produto”, pois estas

considerações são muito específicas e dependentes das localidades, segundo KREWITT (2001).

3.3.4 Recomendações para estudos de ICV de usinas hidrelétricas

Uma vez apresentadas as conclusões genéricas sobre o escopo das ACVs de sistemas de energia nos seminários da EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001) e da OECD (OECD, 1992), foram levantados e estudados as diversas iniciativas internacionais de realização de inventários de ciclo de vida de sistemas de eletricidade, com foco na geração hidrelétrica, tema deste mestrado.

Por meio de uma extensa revisão bibliográfica no tema, foi identificado apenas um caso realmente consistente de ACV de hidrelétrica, os estudos da Vattenfall AB (BRÄNSTRÖM-NORBERG et al., 1996; VATTENFALL, 1999; SWEDISH ENVIRONMENTAL MANEGEMENT COUNCIL, 1999; 2002a; 2002b). Estes estudos se iniciaram internamente, sendo que posteriormente foram adaptados e tiveram seus resultados divulgados na forma de EPD- *Environmental Product Declaration* (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANEGEMENT COUNCIL, 1999; 2002a; 2002b), uma iniciativa de caracterização ambiental de produtos, dentro de um conceito conhecido como rotulagem Tipo III.

Embora existam outros estudos a respeito do ciclo de vida das hidrelétricas, que também foram estudados, estes são ou muito limitados quanto aos aspectos considerados, como o caso dos estudos do Lago Cheelan (CARRINGTON, 2000) e da Agência Internacional de Energia (IEA, 1998; 2000), ou apenas quantificam alguns consumos para fins de monetarização, como o caso do estudo da ORNL (ORNL, 1994) e do projeto ExternE (EUROPEAN COMISSION, 1995; 1997; 1999, MARTINS, et al. 1998). Estes estudos voltados à monetarização possuem o objetivo apenas de comparar genericamente fontes de geração, quase sempre entre fósseis e renováveis. Nestes casos, desprezam-se muitos aspectos da geração hidrelétrica, devido à grande diferença de ordem de grandeza em relação às fontes fósseis. Outra característica é que muitos aspectos são abordados apenas qualitativamente, o que embora para a valoração pareça ser suficiente, não se pode dizer o mesmo para a ACV. Além destas limitações sobre o conteúdo dos estudos, outra dificuldade encontrada foi a reduzida quantidade de informações metodológicas fornecidas nos relatórios de

divulgação destes, que não se encontram em sua forma mais completa, apresentando apenas algumas definições e os resultados finais. Esta limitação em muitos casos não permite a verificação da validade das hipóteses assumidas, comprometendo assim seu uso e comparação.

Por último, cabe ressaltar que a realidade das usinas dos países que já realizaram este tipo de ACV é totalmente distinta da realidade brasileira em termos de relevo, geologia, clima, vegetação, fauna, ocupação demográfica, etc, o que faz com que muitas das hipóteses e dados utilizados não possam ser aplicados diretamente no Brasil.

Estas limitações, conforme já dito, levaram ao desenvolvimento de um trabalho em paralelo, realizado como monografia de fim de curso no PECE- Programa de Educação Continuada em Engenharia, da Escola Politécnica da USP. Neste, estão descritos os principais pontos de cada um destes estudos, incluindo seu contexto, premissas, objetivos, escopo e resultados, quando disponíveis. Para não tornar este documento demasiadamente extenso, decidiu-se não repetir aqui estas observações, mantendo apenas as conclusões finais às quais foi possível chegar a partir dos trabalhos estudados. Desta forma, são apresentadas a seguir algumas conclusões para definições de aspectos tidos como relevantes no desenvolvimento de um ICV de hidrelétricas, recomendações estas coletadas e consolidadas das diversas experiências internacionais encontradas. Para maiores esclarecimentos sobre os resultados desta pesquisa, recomenda-se a leitura de RIBEIRO (2003).

Cabe salientar que as recomendações aqui transcritas são limitadas em função das hipóteses e dos próprios objetos de estudo encontrados. As realidades das usinas e dos contextos dos estudos anteriormente reportados diferem de modo significativo das condições brasileiras, e deve-se ter em mente que podem haver tanto aspectos não considerados aqui que são de relevância, emissão de metano pelos reservatórios por exemplo, como aspectos aqui tidos como de relevância e que não são consideráveis no Brasil, como resíduos radioativos oriundos da geração de energia que alimenta a produção dos materiais de construção.

a) Sobre o modelo utilizado para definir o sistema de produto

Embora em diversos casos de ACV de produtos se verifique a tentativa de buscar como sistema de produto um “processo médio”, modelado matematicamente para ser representativo de um universo de instalações de mesma função, para as usinas hidrelétricas não se constata este procedimento.

Em todos os estudos levantados foi utilizado um mesmo modelo- inventário de uma única usina real- posteriormente extrapolado para a totalidade do sistema hidrelétrico. Os únicos estudos que vão além desta abordagem são os da Vattenfall AB (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002a, 2002b), que realizam este procedimento para mais de uma usina de um mesmo rio, conduzindo ao final uma média.

Assim, recomenda-se que ao realizar estudos de ICV de usinas hidrelétricas no Brasil não seja utilizado um modelo virtual, de “processo médio”, e sim busque-se inventariar uma ou mais usinas tidas como representativas do sistema elétrico.

b) Sobre função e unidade funcional

Segundo apresentado anteriormente, um sistema energético pode ser avaliado sob duas perspectivas: a geração de eletricidade ou a realização de um serviço energético, oriundo do uso desta energia gerada (OECD, 1992).

Dentre estas duas alternativas, temos de modo bastante claro que no caso de se buscar analisar o sistema energético no cumprimento de uma satisfação de necessidade da sociedade (abordagem consequencial) deve-se ter como função a realização de um serviço energético. Neste caso a unidade funcional deve ser uma medida da realização deste serviço, como algum indicador da eficiência de iluminação, aquecimento, etc.

No entanto, ao realizar um inventário de ciclo de vida para uso em outros estudos (abordagem atribucional), como por exemplo ao se buscar constituir uma base de dados, é necessário utilizar como função do sistema a geração de energia elétrica, pois desta forma excluimos do estudo qualquer etapa de uso da energia. Neste caso, a unidade funcional deve ser uma medida da energia gerada, como o kWh, MJ, MWh, etc.

Sobre a alocação dos usos múltiplos que eventualmente o reservatório possa ter, verificou-se que nenhum estudo procede a este cálculo, e portanto só se recomenda que este seja realizado caso haja algum motivo que assim o justifique.

c) Sobre horizonte de análise

Embora ainda não se tenha uma definição sobre qual a vida útil de uma usina hidrelétrica, internacional os estudos encontrados na literatura (CARRINGTON, 2000; IEA, 1998; SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002a, 2002b) parecem estar em consenso sobre o uso do horizonte de análise de 100 anos.

Apenas um estudo apresentou de modo claro um valor distinto, o primeiro estudo realizado pela Vattenfall AB (BRÄNSTRÖM-NORBERG et al., 1999), que utilizou o período de 60 anos. No entanto os próprios realizadores do estudo voltaram atrás na revisão do estudo (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002a), afirmando serem motivados pela experiência adquirida e pelas práticas internacionalmente aplicadas.

Recomenda-se assim que se utilize em ICVs de geração hidrelétrica um horizonte de análise de 100 anos, deixando no entanto sempre claro a indefinição sobre o final da vida útil da usina, e portanto a possibilidade de que após este período a usina siga operativa, ou seja, deve-se incluir na fronteira do estudo a manutenção dos equipamentos.

d) Sobre as fronteiras do sistema de produto

A primeira colocação que deve ser feita sobre a definição das fronteiras do sistema de produto é sobre o escopo temporal, ou seja, as etapas consideradas do ciclo de vida. De modo simplificado, podemos afirmar que em todos os estudos encontrados as etapas se resumem à “construção da usina” e “operação da usina”, sendo que em todos os casos desconsidera-se a desativação do empreendimento.

Quanto escopo espacial, ou seja, os processos incluídos em cada um destas etapas do ciclo de vida, considera-se que são comuns a praticamente todos os estudos e, portanto, aparentemente de extrema relevância, os seguintes processos:

- construção da usina:
 - operação das máquinas de construção;

- produção e transporte dos materiais de construção;
- produção dos materiais dos equipamentos permanentes da usina (turbinas e geradores);
- transporte dos operários;
- operação da usina:
 - degradação da biomassa alagada no reservatório;
 - consumo próprio de energia;
 - manutenção e substituição dos equipamentos permanentes.

Para uma primeira aproximação, recomenda-se seguir o fluxograma de processos estabelecido pela Vattenfall AB (BRÄNSTRÖM-NORBERG et al., 1996; SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 1999; 2002a; 2002b), também usado em outros estudos e o único apresentado de modo explícito, e que além disso atende a todos os requisitos acima de modo claro e objetivo. Este fluxograma é apresentado na Figura 3.06.

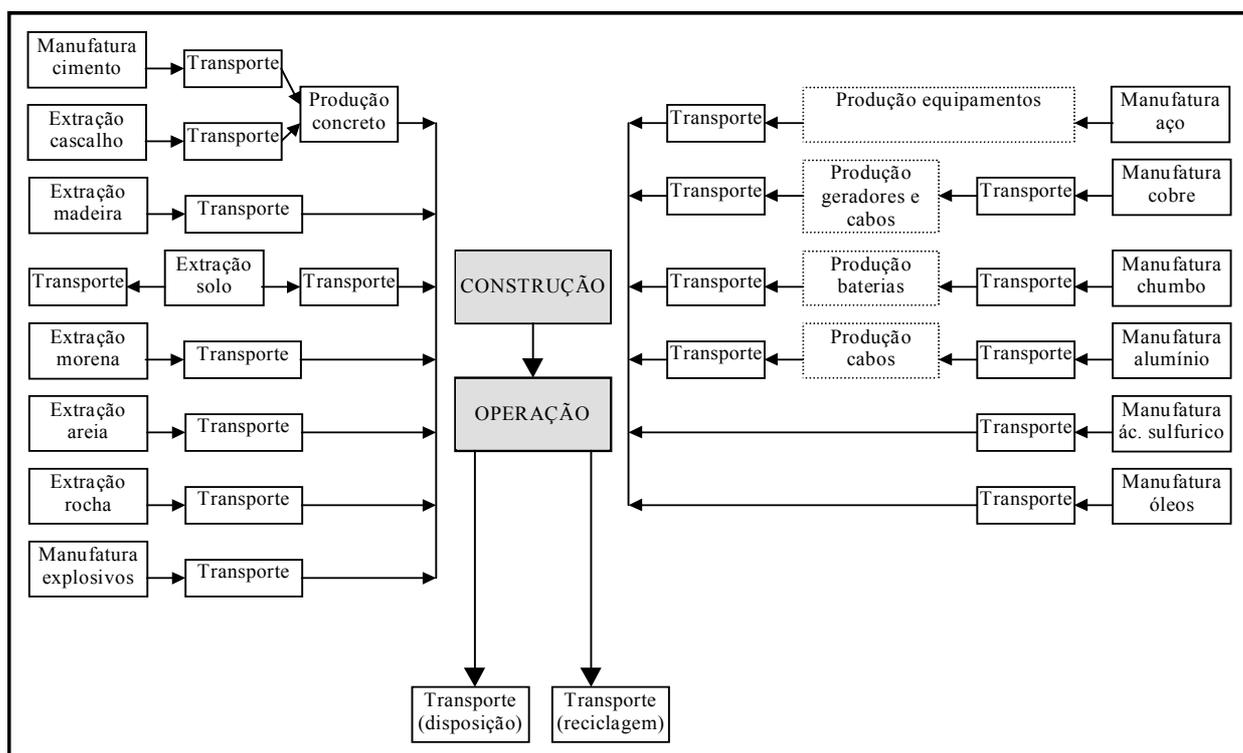


Figura 3.06- Fluxograma Vattenfall para ICV de usina hidrelétrica² (BRÄNSTRÖM-NORBERG et al., 1999).

² *Morena*: depósito transportado e sedimentado pelo gelo, associado a geleiras alpinas ou continentais (LEINZ, LEONARDOS, 1982).

Para estes processos recomenda-se estimar os consumos materiais e energéticos, principalmente uso de combustíveis, e as emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos gerados. Para tanto, embora as relações estabelecidas no evento da EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001) possam servir de guia, não se deve segui-las de modo estrito, uma vez que em função das características construtivas da usina, da matriz energética do país e das condições das indústrias fornecedoras de materiais podem haver aspectos totalmente distintos dos relacionados nestas listas.

Neste sentido cabe uma última recomendação sobre as fronteiras, de deixar ao menos uma categoria de impacto reservada ao uso do solo, em área por unidade funcional, uma vez que diversos impactos não quantificáveis estão relacionados a este aspecto.

e) Sobre as fontes de dados

Em função da experiência internacional levantada neste estudo, verifica-se que os dados referentes aos consumos de insumos pela usina (quantidade usada de concreto, aço, cobre, etc) são obtidos de modo primário, ou seja, referentes à usina em si, levantados junto ao construtor responsável, sendo em muitos casos valores de difícil obtenção pela época em que foram construídas as usinas.

No entanto os ciclos de vida dos materiais e combustíveis são estimados, em todos os casos encontrados, pelo uso de bancos de dados disponíveis para ACV, e que nem sempre representam a realidade tal e qual no momento e no local do empreendimento. As bases de dados usadas correspondem, em todos os estudos encontrados, nas mais adequadas possíveis, em geral aquelas desenvolvidas para fins de ACVs de produtos, referentes à tecnologia atual, sendo em muitos casos as acessíveis aos realizadores do estudo nos programas de computador utilizados para consolidação dos dados.

Ademais, foi verificado nos estudos levantados que na ausência de dados procede-se a estimativas conservadoras destes, realizadas com o auxílio de um especialista, lembrando sempre de deixar todo o processo bem documentado.

f) Consolidação dos resultados encontrados nos estudos

Os resultados apresentados pelos estudos levantados na literatura por RIBEIRO (2003), são de tipo muito diverso, indo desde ICVs completos, como é o caso da

Vattenfall (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002a, 2002b), até relações de poucos consumos materiais, como no caso de diversas referências do projeto ExternE. Do mesmo modo, tanto os objetos de estudo como as hipóteses utilizadas são bastante variados, o que em si pode levar a grandes variações entre resultados.

Mesmo assim é possível observar que alguns valores guardam entre si as mesmas ordens de grandeza, o que pode vir a ser útil para verificação da validade de dados ou hipóteses. Com esta finalidade, apresentam-se os valores de alguns aspectos ambientais tidos como significativos nos estudos encontrados, sendo estes divididos em duas partes, nas Tabelas 3.04 e 3.05.

Tabela 3.04- Comparação de alguns aspectos ambientais para os estudos encontrados- Parte 1 (adaptado de RIBEIRO, 2003)

		BRÄNSTRÖM- NORBERG, 1996.	SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL 1999.	SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002a.	SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002b.	CARRINGTON, 2000	IEA, 2000				IEA, 2001
							Dul Hasti	Oud	Itaipu	La Grande	
Aço	kg/ MWh	0,0787	-	-	-	-	-	0,0556	> 0,010	-	-
Aço estrutural	kg/ MWh										
Concreto	m3/ MWh	-	-	-	-	-	0,0018	-	0,0017	-	-
Cimento	kg/ MWh	0,1319	-	-	-	-	-	0,5556	-	-	-
Cobre	kg/ MWh	0,0025	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Min. Ferro	kg/ MWh	0,1660	0,3010	0,1530	0,1600	0,0613	-	-	-	-	-
Petróleo	kg/ MWh	-	0,2320	0,0785	0,0745	0,1093	-	-	-	-	-
Areia e cascalho	kg/ MWh	-	3,2500	13,8000	3,4000	3,6160	-	-	-	-	-
Calcáreo	kg/ MWh	-	0,4940	0,5650	0,4420	1,1253	-	-	-	-	-
Rocha	kg/ MWh	-	-	35,9000	53,5000	-	-	-	-	-	-
Terra	kg/ MWh	-	-	20,8000	30,7000	0,1227	-	-	-	-	-
Água	kg/ MWh	-	-	2,1300	2,2900	12,0373	-	-	-	-	-
Diesel	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	0,0833	-	-	-
NOx	kg/ MWh	0,0059	-	-	-	0,0053	0,003 a 0,005	0,008 a 0,013	0,003 a 0,006	0,0400	0,003 a 0,042
SO2	kg/ MWh	0,0015	-	-	-	0,0107	0,008 a 0,024	0,02 a 0,06	0,009 a 0,024	0,1000	0,005 a 0,060
CO	kg/ MWh	0,0046	-	-	-	0,0053	-	-	-	-	-
MP	kg/ MWh	0,0007	-	-	-	0,0080	-	-	-	-	0,005
CO2	kg/ MWh	0,71	-	-	-	1,59	1,4 a 2,3	3,8 a 5,9	1,6 a 2,6	1,00	-

(continua)

Tabela 3.04- (continuação).

		BRÄNSTRÖM- NORBERG, 1996.	SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL 1999.	SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002a.	SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002b.	CARRINGTON, 2000	IEA, 2000				IEA, 2001
							Dul Hasti	Oud	Itaipu	La Grande	
Emissão GEE	kg CO2 eq/ MWh	-	11,0	5,2	4,0	-	-	-	-	-	2 a 48
Emissão gases depletores cam. Ozônio	kg CFC-11 eq./ MWh	-	4,04E-07	8,79E-09	9,78E-09	-	-	-	-	-	-
Emissão substâncias acidificação	mol H+/ MWh	-	2,02E-01	1,37E-01	1,54E-01	-	-	-	-	-	-
Emissão gases formadores O3 trop.	kg eteno eq./ MWh	-	1,70E-04	1,79E-04	2,22E-04	-	-	-	-	-	-
Emissão substâncias consum. O2	kg O2/ MWh	-	7,4000	2,9400	2,1000	-	-	-	-	-	-
Uso solo	km2/ MWh	3,5800E-07	3,5900E-07	2,3000E-07	1,0800E-06	-	-	-	-	-	2E-6 a 15,2 E-6
Pay-Back Energético	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48 a 260

Tabela 3.05- Comparação de alguns aspectos ambientais para os estudos encontrados- Parte 2 (adaptado de RIBEIRO, 2003)

		ORNL, 1994						ExternE				Gagnon et al., 2002	
		Rocky	Diobsud	Boulder	Jordan	Irene	Jackman	EUROPEAN COMMISSION, 1997	NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS (1997)	MARTINS et al., 1998	fio d'água	c/ reserv.	
Aço	kg/ MWh	0,3928	0,3000	0,4383	0,7517	0,3541	0,8660	0,1221	-	-	0,0769	-	-
Aço estrutural	kg/ MWh	0,0604	0,0511	0,0499	0,1110	0,0276	0,0962	-	-	-	0,0275	-	-
Concreto	m3/ MWh	0,0028	0,0024	0,0029	0,0044	0,0023	0,0022	0,0064	0,0087	-	0,0066	-	-
Cimento	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cobre	kg/ MWh	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002	0,0001	-	-	-	-	-	-
Min. Ferro	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petróleo	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Areia e cascalho	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	0,0808	-	-	-	-	-
Calcáreo	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rocha	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	0,0140	-	-	-	-	-
Terra	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	0,1937	-	-	-	-
Água	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Diesel	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0972	-	-	-
NOx	kg/ MWh	0,0280	0,0241	0,0287	0,0448	0,0231	0,0250	-	-	0,0061	-	-	-
SO2	kg/ MWh	0,0099	0,0086	0,0103	0,0161	0,0084	0,0096	-	-	0,0006	-	0,001	0,007
CO	kg/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0020	-	-	-
MP	kg/ MWh	0,0019	0,0017	0,0020	0,0031	0,0016	0,0018	-	-	0,0004	-	-	-
CO2	kg/ MWh	2,95	2,48	3,17	5,10	2,66	4,16	-	-	0,31	-	0,001 a 0,005	0,01

(continua)

Tabela 3.05- (continuação)

		ORNL, 1994						ExternE				Gagnon et al., 2002	
		Rocky	Diobsud	Boulder	Jordan	Irene	Jackman	EUROPEAN COMMISSION, 1997	NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS (1997)	MARTINS et al., 1998		fio d'água	c/ reserv.
Emissão GEE	kg CO2 eq/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	0,93	-	2,00	15,00
Emissão gases depletores cam. Ozônio	kg CFC-11 eq./ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissão substâncias acidificação	mol H+/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissão gases formadores O3 trop.	kg eteno eq./ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissão substâncias consum. O2	kg O2/ MWh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Uso solo	km2/ MWh	-	-	-	-	-	-	3,55E-07	-	-	-	1,00E-06	1,52E-04
Pay-Back Energético	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	267	205

Verificando os dados apresentados, constata-se alguma variância dos aspectos entre os estudos. Embora como anteriormente afirmado estes possuam entre si alguma ordem de grandeza comum, é patente grandes variações entre cada estudo, o que nos permite concluir uma afirmação que até o momento era baseada no bom senso: que cada hidrelétrica é um caso em particular, e que resultados de um estudo podem ser totalmente distintos de outro. Esta constatação se aplica principalmente se tentarmos comparar dados obtidos de usinas brasileiras com os aqui apresentados, devido a suas características construtivas totalmente distintas. Desta forma, não se recomenda a utilização dos dados aqui apresentados diretamente.

Além dos resultados apresentados nas Tabelas 3.04 e 3.05, recomenda-se utilizar, para o mesmo fim e tomando os mesmos cuidados, os dados da Vattenfall em 2002 (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002a, 2002b), que apresentam a quantificação de diversos aspectos ambientais destes estudos.

4. METODOLOGIA UTILIZADA

4.1 Significado de “modelo” no método científico

De modo bastante simplificado, pode-se afirmar que na pesquisa científica os modelos são aquilo que se observa dos objetos de estudo, ou seja, o conjunto de informações que são coletadas e separadas da realidade por serem de interesse ao pesquisador.

Como exposto por ANDERY et al. (1988), “a ciência se caracteriza por ser uma tentativa do homem em entender e explicar racionalmente a natureza, buscando formular leis que, em última instância, permitem a atuação humana”. Segundo os autores, “enquanto tentativa de explicar a realidade, a ciência se caracteriza por ser uma atividade metódica”, sendo “o método um reflexo das nossas necessidades e possibilidades”.

Dado este contexto, podemos entender os modelos como os instrumentos de trabalho e operacionalização do método científico, sendo uma representação sintética (e portanto não analítica) da realidade, conforme apresentado por BRANCO (1989). Desta forma, a elaboração de um modelo significa não um processo de decomposição do objeto observado em suas partes (procedimento analítico), mas sim numa tentativa de compor os diversos componentes do objeto num todo, consolidado e representativo da essência da realidade observada (procedimento sintético), este sim passível de análise.

De modo específico para este trabalho de pesquisa, pode-se dizer que o desenvolvimento de um ICV consiste num processo que demanda grandes volumes de informações, quase sempre de difícil obtenção, e que demanda considerável quantidade de tempo e esforço. Desta forma, deve-se buscar uma representação sobre a realidade estudada que possua uma extensão e profundidade adequadas à disponibilidade de recursos humanos e de informação e que permita a realização do estudo dentro do cronograma previsto, mas sempre garantindo certa representatividade quanto ao sistema real.

Assim, o estabelecimento do modelo a ser estudado é de suma importância, devendo ser considerada com cautela a relação entre o grau de simplificação da realidade e os objetivos aos quais o estudo se propõe, de modo que se tenha de fazer um mínimo de

aproximações, trabalhando o máximo possível com dados reais obtidos especificamente para cada instalação. Este cuidado é essencial para a obtenção de um estudo de qualidade.

4.2 Estabelecimento de um modelo representativo

Tendo em vista o objetivo deste estudo de gerar e disponibilizar um ICV representativo da geração de eletricidade no Brasil, a realidade sobre a qual se deve estabelecer o modelo é obviamente a geração de eletricidade no país.

No presente estudo, o processo de escolha do modelo a partir desta realidade foi fruto de extensa pesquisa, cujos principais resultados são retratados no Capítulo 3- Revisão bibliográfica. Este levantamento, realizado tanto sobre as usinas hidrelétricas do Brasil e sua participação na matriz energética brasileira, como sobre as experiências internacionais de aplicação da ACV em usinas hidrelétricas, permitiu não apenas adquirir sensibilidade para definir o modelo a ser estudado, como também trouxe uma inerente experiência sobre como realizar modelos para bancos de dados de ACV, tema até então intocado no meio científico nacional. Este aspecto não será tratado especificamente neste Capítulo, mas deve ser ressaltado como resultado colateral do desenvolvimento desta pesquisa.

Considerando que no Brasil existem diversas formas de se gerar eletricidade em operação, que o número de instalações geradoras é bastante elevado, e que há importantes diferenças entre as tecnologias e condições construtivas e operacionais de cada uma, concluiu-se logo após a definição do tema deste trabalho que seria imprescindível limitar seu escopo, de modo a adequar a extensão da tarefa a realizar a um trabalho de mestrado.

Considerando que a maior parte dos trabalhos desenvolvidos internacionalmente neste tema são, em todos os casos encontrados, realizados por grupos de trabalho de dezenas de profissionais e por períodos de tempo de alguns anos, é bastante compreensível que a adequação de escopo neste caso seja bastante restrita. Assim, deve-se limitar a abrangência do modelo a um universo mínimo, mas que no entanto garanta representatividade suficiente para não comprometer a qualidade dos resultados, a partir do qual posteriormente poderão se agregar outros estudos, num processo convergente de melhoria contínua dos resultados. Este processo, espera-se,

deve ocorrer com razoável facilidade, uma vez que diversas dificuldades metodológicas e conceituais já terão sido ao menos encaminhadas à solução pelo presente estudo.

Neste sentido, uma primeira hipótese admitida sobre a realidade observada foi que para fins de modelagem deve-se restringir o universo de análise às instalações pertencentes à rede de transmissão e distribuição nacional, o chamado SIN- Sistema Interligado Nacional. Esta premissa exclui algumas unidades consumidoras de eletricidade que não estão conectadas à rede, como certas localidades da região amazônica, algumas áreas rurais, etc.

Outra restrição necessária diz respeito ao tipo fonte de geração de eletricidade estudada. Uma vez que a geração de energia no Brasil é realizada a partir de uma série de fontes, como a hidrelétrica, termelétrica a gás, biomassa, nuclear, etc, e este trabalho não possui recursos humanos ou financeiros suficientes para avaliar esta diversidade de tecnologias, é necessário limitar o objeto de estudo a uma dentre estas tecnologias, de modo a focar as atenções do estudo.

Como visto na revisão bibliográfica realizada, sabe-se que dentro da matriz energética brasileira a maior parte da eletricidade é originária de usinas hidrelétricas. No ano pesquisado, 2000, esta representou 84,3% da geração elétrica (BRASIL, 2001), sem contar com as importações de energia. Em vista desta predominância, decidiu-se por restringir o estudo a um ICV da geração hidrelétrica no Brasil.

Uma vez definida a geração hidrelétrica como objeto de investigação, há duas possíveis abordagens para a definição do modelo, segundo as discussões realizadas no evento promovido pela EPA (ESTADOS UNIDOS, 2001):

i. uso de um processo médio:

No caso em que se tenha um universo de unidades produtivas (denominadas de “elementos”) de um mesmo tipo/ tecnologia para os quais seja possível garantir certa padronização das operações que geram aspectos ambientais, e admitindo a possibilidade de estabelecimento de modelos ou simulações numéricos para determinar a magnitude destes aspectos à partir de variáveis de processo conhecidas, aplicam-se estes modelos para cada elemento, gerando ICVs individuais.

O ICV final, representativo do universo em estudo, é obtido por meio da ponderação dos ICVs individuais, usando como fator a contribuição de cada elemento dentro do universo.

ii. extrapolação de um inventário significativo

Esta alternativa por sua vez consiste em inventariar uma unidade produtiva que seja representativa do sistema em termos de sua contribuição ao cumprimento total da função estudada. Esta opção é bastante interessante quando há predominância de uma empresa, processo ou tecnologia no universo de interesse, ou quando há grande variabilidade das características dos processos entre os elementos do universo considerado. Obtendo o inventário da unidade mais representativa do universo, extrapola-se seu resultado, obtendo uma aproximação do que seria o inventário do universo em estudo.

Embora não aborde todas as unidades, este procedimento garante que se obterá maior profundidade nos dados dos aspectos, uma vez que se trata de um processo real sendo analisado, o que exclui os inconvenientes da modelagem matemática.

Além disso o ICV obtido pode posteriormente ser acrescido de inventários das outras unidades do universo, caminhando passo a passo à consolidação de um inventário preciso.

Embora a experiência internacional aponte para a segunda alternativa no caso das hidrelétricas, como já foi indicado na revisão bibliográfica, decidiu-se estudar com mais cuidado a primeira alternativa, antes de eliminá-la.

Desta forma, conduziu-se uma extensiva pesquisa bibliográfica (BROWN, 1958; CREAGER; JUSTIN, 1950; GAIOTO, 2001; JENSEN, 1988; KLINGENBERG, 1923; MOSONYI, 1963; RAABE, 1985; SCHREIBER, 1978; THOMAS, 1976), após a qual foi possível concluir que a literatura trata em separado das técnicas construtivas para cada tipo de estrutura de barragem, o que condiz com o esperado de que não há um processo médio, típico, de construção de usinas hidrelétricas, posto que cada caso é distinto dos demais em função de características do local e do empreendimento em si, além de condicionantes econômicas, políticas e sociais particulares.

Esta dificuldade pode igualmente ser observada ao levantar-se as características construtivas das usinas brasileiras, obtidas no Cadastro Nacional de Barragens, mantido pelo CBDB- Conselho Brasileiro de Barragens e constante no Anexo A- Usinas Hidrelétricas do Brasil (CBDB, 2002). Observando este cadastro é possível verificar que não há correlação entre os diversos parâmetros, como altura da barragem ou volume do reservatório e potência instalada. Esta constatação serviu como fator definitivo na decisão sobre como selecionar uma forma de modelagem neste trabalho, confirmando a validade do que é internacionalmente realizado, ou seja, o desenvolvimento de um inventário representativo e sua posterior extrapolação, como citado nas referências bibliográficas deste documento.

Uma vez escolhida esta abordagem, as atenções voltaram-se novamente ao conjunto das hidrelétricas brasileiras, para a escolha de uma usina representativa. Tendo em vista que a ACV é uma metodologia que trabalha com a análise do cumprimento de uma função, no caso a geração de eletricidade, o critério de escolha da usina a ser inventariada deve ser relativo à sua representatividade em relação à quantidade de energia gerada dentro do total gerado no SIN. Obviamente com este procedimento chegou-se à Usina Hidrelétrica de Itaipu, a maior usina hidrelétrica do mundo até o presente momento, e que como apresentado na revisão bibliográfica contribuiu em 2000 com 22,4% da eletricidade gerada no país, o que garante sua representatividade no sistema.

Embora tenha-se plena consciência de que o inventário de Itaipu certamente não é representativo de outras usinas, por possuírem estas características construtivas bastante distintas, pode-se dizer pela sua contribuição ao total de energia consumido no país que seu ICV será representativo da matriz elétrica nacional, ao menos até que novos estudos sejam realizados complementando seus resultados com ICVs de outras usinas ligadas ao SIN.

4.3 Adaptações metodológicas sobre a norma NBR ISO 14.040

Embora este estudo consista num levantamento de um ICV, e se pretenda seguir a metodologia normalizada já exposta (ABNT, 2001), em alguns momentos certas etapas da metodologia foram agrupadas ou ligeiramente modificadas. Porém deve-se ressaltar que estas mudanças restringem-se meramente a nomenclaturas e

procedimentos de registro e apresentação das informações, visando tão somente facilitar a execução e/ou a compreensão do trabalho, sem prejuízo ao seu desenvolvimento ou seus resultados.

Em relação a estas modificações, a etapa de *Definições* da metodologia não será alterada, obedecendo estritamente ao apresentado no Capítulo 3, elaborado a partir das normas internacionais.

Já a etapa de Inventário de Ciclo de Vida terá a divisão de alguns procedimentos ligeiramente alterada. Primeiramente, a etapa de *preparação da coleta de dados* não será descrita aqui como sugerido pelas normas (ABNT, 2001; ISO, 1998, 2000a, 2000b, 2001), mas sim apenas será dividida em duas partes, denominadas de “*estudo do modelo escolhido*” e “*fluxograma de processo e identificação dos aspectos ambientais*”.

Na etapa de *coleta de dados* por sua vez, é onde ocorre a principal modificação digna de nota. Na verdade o que se fez foi dividir a *coleta de dados* em duas partes distintas. Primeiramente levantou-se os dados referentes às entradas e saídas de matéria e energia da obra da usina, sejam estas fluxos elementares (provenientes ou destinados diretamente ao meio natural) ou relativos a insumos utilizados. Assim neste procedimento, aqui denominado como “*estimativa dos processos do ciclo de vida de Itaipu*”, quantifica-se as quantidades de aço, cimento, diesel, etc utilizado na usina, seja na sua construção, seja na sua operação.

Num segundo momento da coleta de dados, buscou-se estimar os aspectos ambientais referentes à obtenção dos insumos anteriormente quantificados, ou seja, o aço, cimento, diesel, etc. Este processo é aqui denominado de “*estimativa do ciclo de vida dos insumos*”, embora os dados levantados sejam referentes apenas à obtenção dos insumos, e não a seu ciclo de vida completo.

De modo a não prejudicar a leitura deste documento, as duas etapas citadas da coleta de dados tem suas hipóteses, cálculos e estimativas apresentadas respectivamente nos Anexos D e E, intitulados com a denominação de cada etapa, sendo que no Capítulo 5 apresentam-se apenas os resultados consolidados.

Cabe dizer aqui que, considerando que não existem bases de dados brasileiras para os insumos em questão- sendo exatamente este o problema de cuja solução este trabalho pretende fazer parte- foi necessário desenvolver estimativas dos ciclos de vida dos

insumos especificamente para esta trabalho. Embora tenha-se consumido quantidades razoáveis de tempo e esforço na consecução destes bancos de informação, não é intuito deste estudo desenvolver bases de dados de cimento, aço, derivados de petróleo, etc. Assim sendo, não se recomenda o uso dos valores aqui estimados para realidades distintas das de Itaipu, uma vez que todas as hipóteses de alocação, nível tecnológico, distâncias transportadas, etc foram desenvolvidas de acordo com as condições da indústria brasileira da época, como pode ser notado ao longo do texto do Anexo E.

Esta divisão, diga-se, foi idealizada com o intuito de inclusive atualizar os dados de obtenção dos insumos, quando forem disponíveis bases de dados específicas com informações mais precisas e detalhadas.

De posse destas duas etapas concluídas, procedeu-se à etapa de *procedimento de cálculo* proposta na metodologia, que na verdade consiste na consolidação do ICV.

Sobre a etapa de “*refino das fronteiras*”, considerou-se sua realização no âmbito deste trabalho, dadas suas limitações de recursos, inócua. Entende-se que para que esta fosse conduzida de modo satisfatório e efetivo, seria necessário um grande esforço de nova coleta de dados primários, específicos para o caso de Itaipu. Na impossibilidade de executar tal tarefa, julgou-se mais adequado apenas relatar as possibilidades de refino de fronteira no Capítulo 6, de discussão de resultados.

Por último, cabe dizer que não houve a execução de Avaliação de Impactos, por tratar-se este de um trabalho de Inventário de Ciclo de Vida apenas. Este procedimento teve importantes conseqüências na discussão dos resultados, como abordado no Capítulo 6.

4.4 Sobre os recursos computacionais utilizados

A respeito dos recursos computacionais utilizados, decidiu-se buscar para uso neste trabalho um programa de computador específico para ACV, principalmente na *consolidação do inventário*, devido à necessidade de:

- trabalhar com grande quantidade de dados;
- incorporar bancos de dados relativos aos ciclos de vida de alguns insumos;
- facilitar modificações durante o estudo;

- disponibilizar os resultados do ICV de modo prático aos usuários, e
- permitir a atualização dos resultados quando forem disponíveis dados mais detalhados dos processos.

Para auxiliar na seleção do programa a ser utilizado, lançou-se mão de um estudo desenvolvido como dissertação de mestrado no ano de 2001, por uma pesquisadora do GP2 (BENJAMIN, 2001) que desenvolveu e aplicou aos principais programas de ACV disponíveis no mercado um modelo de avaliação. Este modelo contempla cinco aspectos: bases de dados disponibilizadas, tratamento de dados, apresentação de resultados, interface com o usuário e interface com outros programas. Cabe destacar que estes requisitos foram ponderados, tendo os dois primeiros recebido peso 3, o último peso 2 e os demais peso 1.

Como resultado deste estudo, de aplicação do modelo ponderado de avaliação de programas de ACV, três alternativas de programas receberam a maior nota. Dentre estes, selecionou-se para uso neste trabalho o SimaPro (PRÉ CONSULTANTS, 2003). Uma vez que não é intuito deste trabalho entrar nos princípios de funcionamento do programa, recomenda-se que os interessados em maiores informações remetam-se diretamente aos manuais do mesmo, disponíveis na página Internet da empresa (PRE CONSULTANTS, 2003).

Não é intuito deste trabalho descrever como o sistema de produto inventariado foi estruturado dentro do programa, uma vez que este foi usado apenas como uma ferramenta adicional para facilitar a realização dos cálculos neste estudo, e esta descrição além de extensa seria de pouca utilidade. No entanto apenas para demonstrar que a estrutura adotada na coleta de dados é reproduzida de modo idêntico no programa, cabe um breve comentário sobre seu funcionamento.

As unidades fundamentais do SimaPro são os chamados “processos”, onde são especificados conjuntos de entradas e saídas. Estas entradas e saídas podem ser tanto em relação ao meio natural, quando são chamadas de “substâncias”, quanto em relação a outros processos.

Para especificar os aspectos ambientais o programa dispõe de uma série de bases de dados com conjuntos de substâncias e processos. Além disso pode-se criar novos processos especificados pelo usuário, e desta forma ir construindo sua base de dados.

Uma vez definidos e correlacionados os diferentes processos, criam-se “fases do produto”, que relacionam estes processos encadeando-os de modo semelhante a um fluxograma de processos, nas chamadas “árvores”.

Para obter o inventário consolidado, o programa pondera os processos, segundo os fatores aplicados em cada fase de produto, somando suas contribuições.

Apenas para que se esclareça o uso do programa, criou-se para cada processo descrito nos Anexos D e E um “processo” no SimaPro, com a mesma denominação. Estes foram então montados para constituir as duas etapas do ciclo de vida, a Construção e Operação da usina, admitindo um prazo de 100 anos. Desta forma, obtém-se uma consolidação dos aspectos ambientais para 100 anos de operação da usina.

De modo a obter os dados por unidade funcional (MWh gerado), um último processo simplesmente tem como entrada a unidade de processo do ciclo de vida de Itaipu estimado para os 100 anos, multiplicada pelo inverso da energia gerada no período em MWh.

5. INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA DE ITAIPU

Neste Capítulo é realizado o levantamento do ICV de Itaipu, segundo as etapas propostas pela norma (ABNT, 2001) e modificadas de acordo com as considerações do Capítulo 4.

5.1 Definições

5.1.1 Objetivo

O objetivo do presente estudo é disponibilizar um Inventário de Ciclo de Vida (ICV) da eletricidade gerada no em hidrelétricas no Brasil. Sua principal aplicação encontra-se nos estudos de ACV de produtos que consomem a eletricidade transmitida pelo SIN- Sistema Interligado Nacional, sendo assim um banco de dados dedicado à ACV da eletricidade brasileira.

A justificativa para a realização deste estudo encontra-se na necessidade de disponibilização de bases de dados nacionais para que se possam desenvolver ACVs de qualidade no país, como já justificado no Capítulo 1. Com informações deste tipo é possível reduzir tempo e custo das análises, ao mesmo tempo que se aumenta a representatividade dos resultados de ACVs dos produtos. Esta necessidade é reforçada pela peculiaridade de nossa matriz energética, predominantemente hidrelétrica, para a qual o uso de dados de outros países agrega incoerências significativas.

Sobre o público-alvo do inventário, este consiste em usuários da metodologia da ACV que tenham nos ciclos de vida sob sua análise o consumo de energia elétrica do SIN, embora outros usos possam vir a ser desenvolvidos, como por exemplo o estudo dos aspectos ambientais da construção de hidrelétricas e sua comparação com usinas termelétricas.

5.1.2 Escopo

a) Sistema de Produto:

O cerne do sistema de produto a ser estudado consiste na Usina Hidrelétrica de Itaipu, responsável pela geração de eletricidade no modelo considerado, segundo as considerações do Capítulo 4.

Além disso, a fronteira contempla os processos envolvidos no fornecimento de insumos básicos para a obra, a saber: cimento, aço, cobre, diesel e óleos lubrificante e de transformador, além dos transportes relacionados. A delimitação dos processos considerados neste sistema é detalhada no item relativo às fronteiras iniciais do sistema.

Deve-se ressaltar que neste estudo serão consideradas as etapas de construção e operação da usina, mas não sua desativação. Esta definição segue as recomendações realizadas no Capítulo 3, baseadas na experiência internacional.

Embora, conforme apresenta SÁNCHEZ (2001), futuramente o problema do passivo ambiental da desativação de uma hidrelétrica possa se apresentar, até o momento não há nenhum registro de caso desta natureza para usinas de grande porte no mundo, e qualquer hipótese seria meramente especulativa. Além do mais, para uma obra das dimensões de Itaipu é difícil imaginar a remoção das obras civis, sendo provável que no caso da usina se tornar improdutiva um dia, a barragem e demais estruturas permaneçam onde estão. Sendo assim, neste estudo não será incluída a etapa de desativação da usina.

b) Função do sistema de produto

Dado o objetivo e o sistema de produtos indicados, pode-se definir que a função do sistema a ser estudado é gerar eletricidade.

c) Unidade funcional (UF)

A unidade funcional deste estudo é a geração de 1 MWh de eletricidade, obtido na saída do gerador das usinas. Esta unidade foi escolhida por ser uma medida relacionada à função a ser avaliada (energia), e por ser uma grandeza de fácil manipulação matemática.

d) Fronteiras iniciais do sistema

- *Fronteiras em relação ao sistema natural:*

Uma vez definido o sistema de produto, devemos verificar como este se situa dentro do meio natural.

Para o caso de Itaipu, será considerado que a usina interage com o meio natural consumindo os seguintes recursos:

- água, captada do rio Paraná e incorporada à usina;
- rocha, terra e areia, retiradas das proximidades da obra e utilizada na construção;

Os demais fluxos elementares do sistema de produto são atribuídos ao ciclo de vida dos insumos, e serão identificados mais adiante.

- *Fronteiras de bens de capital:*

Conforme apresentado no Capítulo 3, uma ACV de usina hidrelétrica é bastante distinta dos estudos tradicionais de ACV de produtos, uma vez que as principais contribuições aos aspectos ambientais são provenientes da fase de construção da infra-estrutura, ou seja, a usina. Desta forma, quanto aos bens de capital pode-se considerar que esta é em si uma ACV de um bem de capital- a usina de Itaipu.

Sobre a construção da usina, há dois aspectos de bens de capital que são relevantes de serem avaliados quanto à inclusão: as obras de infra-estrutura habitacional e do canteiro de obras. Estas duas estruturas são responsáveis pelas condições para que a obra exista, e sua inclusão no estudo deve ser avaliada.

No que diz respeito à infra-estrutura habitacional e suas benfeitorias anexas, não será atribuída carga ambiental à construção de Itaipu, tanto pelas quantidades materiais envolvidas (pouco relevantes em comparação às da obra da barragem) como pela incorporação das benfeitorias aos municípios após o término da obra, como apresentado e justificado no Anexo D.

No que diz respeito aos consumos materiais e energéticos para o estabelecimento do canteiro de obras, deve-se ressaltar que este possuía enormes dimensões, com equipamentos que segundo ANDRIOLO (2003) tiveram grande parte de sua vida útil esgotada na obra. Desta forma, e considerando a recomendação internacional de incluir nos estudos as instalações que possuem o único propósito de atender à obra, considerou-se três aspectos da sua construção e operação do canteiro: consumo de aço, eletricidade e concreto. O consumo de concreto foi estimado como muito reduzido em relação ao demais da obra, sendo desconsiderado posteriormente, mas o

aço e eletricidade entram na contabilidade das cargas ambientais da construção da usina.

Cabe dizer que uma vez que esta energia elétrica era proveniente de hidreletricidade, considerou-se a eletricidade consumida como fluxo elementar “energia hidrelétrica”. Cabe dizer que as estimativas destes consumos foi conduzida para cada sistema do canteiro, sendo que as hipóteses e cálculos realizados encontram-se descritos no Anexo D.

- *Fronteiras em relação a outros sistemas:*

Provavelmente a definição da fronteira em relação a outros sistemas é a mais complexa de todas. O que internacionalmente se recomenda é que se promova uma análise prévia, conhecida como “*screening*”, genérica e que permita inferir quais os principais aspectos ambientais do sistema de produto, que em seguida são detalhados e estudados mais a fundo.

Outra recomendação em geral adotada é utilizar a experiência dos executores do estudo no assunto, para que se possa definir os sistemas que devem ou não serem incluídos nas fronteiras iniciais.

No caso deste estudo, em função principalmente de suas restrições de tempo e recursos humanos, decidiu-se utilizar como “*screening*” os resultados da Vattenfall AB (BRÄNSTÖM-NORBERG et al., 1996; SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 1999; 2002a, 2002b; VATTENFALL, 1999). Segundo estes, os insumos principais para construção da barragem e dos equipamentos da usina são o aço, cobre, diesel, óleos lubrificante e de transformador e cimento.

Desta forma, as fronteiras propostas nestes estudos, e que serão admitidas como fronteiras iniciais aqui, são apresentadas na Figura 5.01.

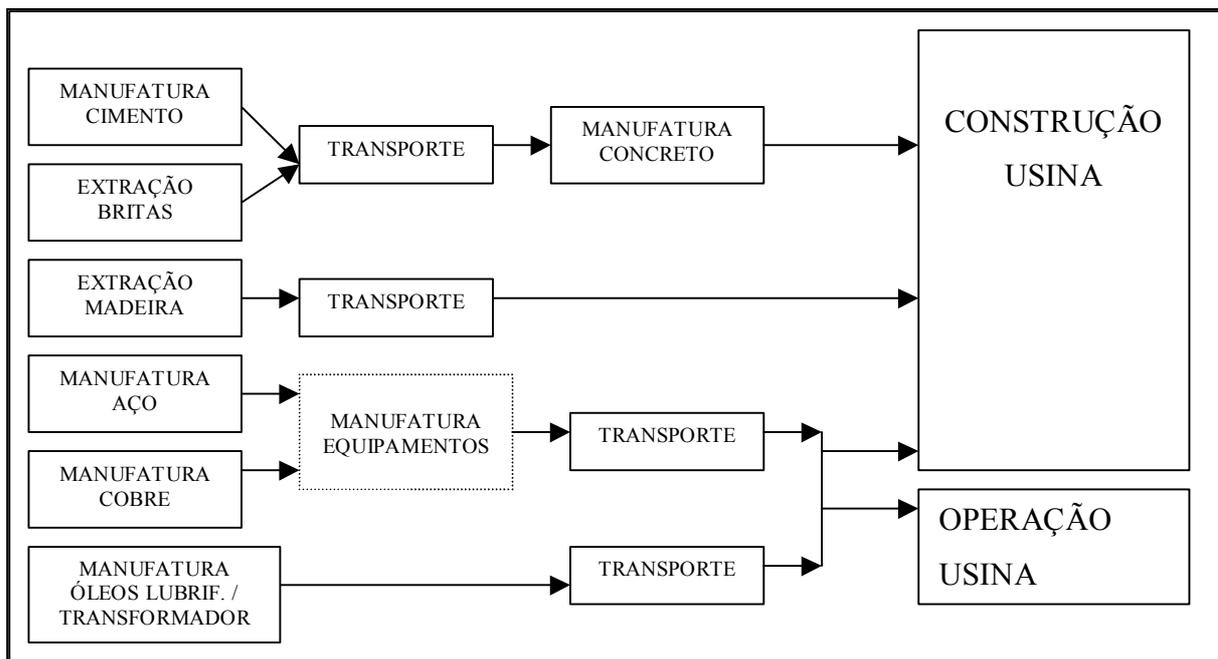


Figura 5.01: Fronteiras iniciais (simplificado a partir de BRÄNSTÖM-NORBERG et al., 1996).

- *fronteira geográfica:*

Como este estudo busca definir um ICV para a usina de Itaipu, a localização geográfica do sistema de produto encontra-se bastante definida. Esta consiste principalmente no local da obra, sendo também incluídos os fornecedores dos insumos utilizados, para os quais tem-se definidas as plantas de cimento e aço, além das usinas termelétricas fornecedoras de cinzas, todas as quais oportunamente apresentadas.

Desta forma, a validade deste estudo restringe-se a este escopo geográfico, da usina de Itaipu pontualmente. No entanto, como já explicado, enquanto não houverem outros estudos de ICV de hidrelétricas no Brasil, os resultados aqui obtidos podem servir como uma primeira aproximação da geração de eletricidade no SIN, desde que observadas as devidas limitações desta extrapolação.

- *fronteira temporal:*

Sem dúvida a consideração mais importante sobre a fronteira temporal diz respeito à definição do período de análise e da vida útil das estruturas e componentes, uma vez que os impactos da construção da usina, aparentemente os mais significativos, deverão ser alocados através da energia gerada ao longo de sua vida útil.

Conforme já exposto, a estimativa de horizonte de análise é muito relativa, sendo que cada autor afirma que as hidrelétricas possuem uma determinada vida útil. No entanto, para a realização de estudos de ACV de hidrelétricas parece haver um consenso, conforme exposto no Capítulo 3, sobre o uso de 100 anos como período de análise. Seguindo novamente as recomendações elaboradas nesta parte do estudo, será usado neste inventário este valor de 100 anos, contados a partir de 1974, ano de início das obras. Para as estimativas dos ciclos de vida dos insumos no entanto utilizou-se como ano base 1977, ano de desvio do rio, quando se iniciou efetivamente o consumo de diversos materiais (cimento, aço, cobre, etc).

Sobre a vida útil dos equipamentos permanentes, tem-se que estas são certamente inferiores ao período de análise da usina, de 100 anos. De modo a realizar as estimativas, utilizou-se para os equipamentos eletromecânicos os valores de vida útil dados por SCHREIBER (1978), os únicos encontrados durante os estudos realizados para as usinas hidrelétricas. Com estes valores pode-se calcular tanto o número de reposições nos 100 anos como os consumos com taxas de manutenção no período. As hipóteses assumidas sobre estes consumos e a aplicação destes valores aos equipamentos encontram-se ao longo do Anexo D, onde se estima os consumos de materiais utilizados na fabricação dos equipamentos eletromecânicos de Itaipu.

e) Procedimento de alocação

A usina de Itaipu foi construída com o único propósito de geração de eletricidade, embora *a posteriori* tenham-se desenvolvido outros usos para o lago do reservatório. Tendo em conta esta verificação, e seguindo as recomendações do Capítulo 3, não será feita alocação do inventário para os usos múltiplos do reservatório.

f) Metodologia de avaliação de impacto

Como este estudo consiste apenas em um inventário de ciclo de vida, não será realizada a etapa de Avaliação de Impactos da metodologia da ACV.

g) Requisitos de dados

Os dados a serem levantados devem ser sempre os mais precisos possível dentro das possibilidades, sendo inicialmente a busca realizada sobre dados ditos primários, ou seja, da própria usina. Para obter a quantificação dos fluxos de matéria e energia da

usina realizou-se contato com o pessoal da Itaipu Binacional, que forneceu alguns dados imprescindíveis sobre os consumos de insumos.

Ademais das informações passadas pessoalmente, utilizou-se a extensa literatura publicada pela empresa, e de periódicos, livros e artigos sobre a usina. Em outros casos, foram consultados especialistas da área que atuaram na obra de Itaipu ou de outras hidrelétricas.

Para os casos onde não foram obtidos dados diretamente da usina, utilizou-se informações de situações semelhantes, guardadas as devidas precauções e sempre notificando as limitações de precisão inerentes a estes processos. Todas estas fontes de dados, suas limitações, as hipóteses assumidas e as estimativas realizadas encontram-se detalhadas no Anexo D.

Quanto aos processos de obtenção dos insumos (aço, diesel, cimento, etc), foram desenvolvidas estimativas com base em alguns bancos de dados existentes e na literatura da época disponível, tendo sido todo o processo documentado devidamente no Anexo E.

h) Análise crítica

Por este estudo constituir-se de uma dissertação de mestrado, não será realizada análise crítica. No entanto, nada impede que futuramente, perante alguma necessidade específica, seja realizada uma análise crítica seguindo as recomendações das normas internacionais.

i) Tipo e formato do relatório final:

Da mesma forma que no item anterior, há que se considerar a característica deste estudo enquanto dissertação de mestrado. Desta forma, pretende-se que o documento de dissertação apresentado tenha a função de relatório final.

5.2 Inventário de ciclo de vida

5.2.1 Preparação para a coleta de dados

a) Estudo do modelo escolhido

As fronteiras inicialmente propostas para o estudo foram definidas a partir de trabalhos semelhantes realizados em uma realidade distinta da encontrada na usina de Itaipu, basicamente por meio dos estudos da VATTENFALL AB na Suécia (BRÄNSTRÖM- NORBERG et al., 1996; SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 1999, 2002a, 200b; VATTENFALL, 1999). Fez-se necessário portanto, como primeira providência do inventário, a realização de um estudo do modelo escolhido, a usina de Itaipu, de modo a verificar a validade, excluir ou acrescentar processos às fronteiras iniciais e assim determinar o sistema de produto a ser abordado.

Ademais de extensa pesquisa bibliográfica em publicações da empresa e nas revistas especializadas publicadas à época da construção, procedeu-se ao contato pessoal com técnicos da Itaipu Binacional e outros profissionais que atuaram nas obras da usina, como já apresentado. Deste contato surgiu a oportunidade de realizar uma visita técnica a usina, especialmente direcionada para os fins deste trabalho, onde além de conhecer as instalações teve-se então a oportunidade de entrevistar diversos técnicos e solicitar dados primários. Os contatos realizados com estas pessoas aportaram diversos dados essenciais ao trabalho, sendo todos estes referenciados neste documento como “comunicação pessoal” (MESCOLIN, 2002).

Nesta parte do trabalho grande volume de informação foi obtida e de modo a não sobrecarregar este documento e prejudicar o ritmo de leitura, decidiu-se consolidar e resumir estas informações no Anexo C. Posteriormente os processos do ciclo de vida de Itaipu e dos insumos são quantificados, respectivamente nos Anexos D e E.

Como já citado anteriormente, ao longo deste capítulo o texto remeterá diversas vezes aos Anexos, onde constam não apenas dados obtidos, mas principalmente memoriais de cálculo, estimativas, hipóteses e aproximações utilizadas. Embora de essencial presença para o pleno entendimento das premissas desta análise e do ICV, a inclusão destas informações aqui prejudicaria o ritmo de leitura, como já exposto. Preferiu-se assim manter este capítulo o mais objetivo possível, mas disponibilizando aos interessados todo o procedimento realizado, na forma dos Anexos.

b) Fluxograma de processo e identificação dos aspectos ambientais

Uma vez estudadas as características e o processo construtivo da usina, pode-se avaliar as fronteiras inicialmente propostas no fluxograma da Figura 5.01, de modo a adequá-lo à realidade do sistema de produto em questão.

De posse dos primeiros dados, criou-se um novo fluxograma de processos, que reflete a fronteira proposta e permite a visualização do ciclo de vida a ser estudado para Itaipu. Com a construção do fluxograma de processos identificou-se também os respectivos fluxos de matéria e energia mais relevantes, quantificados no Anexo D. Estas informações são todas apresentadas de modo consolidado na Figura 5.02.

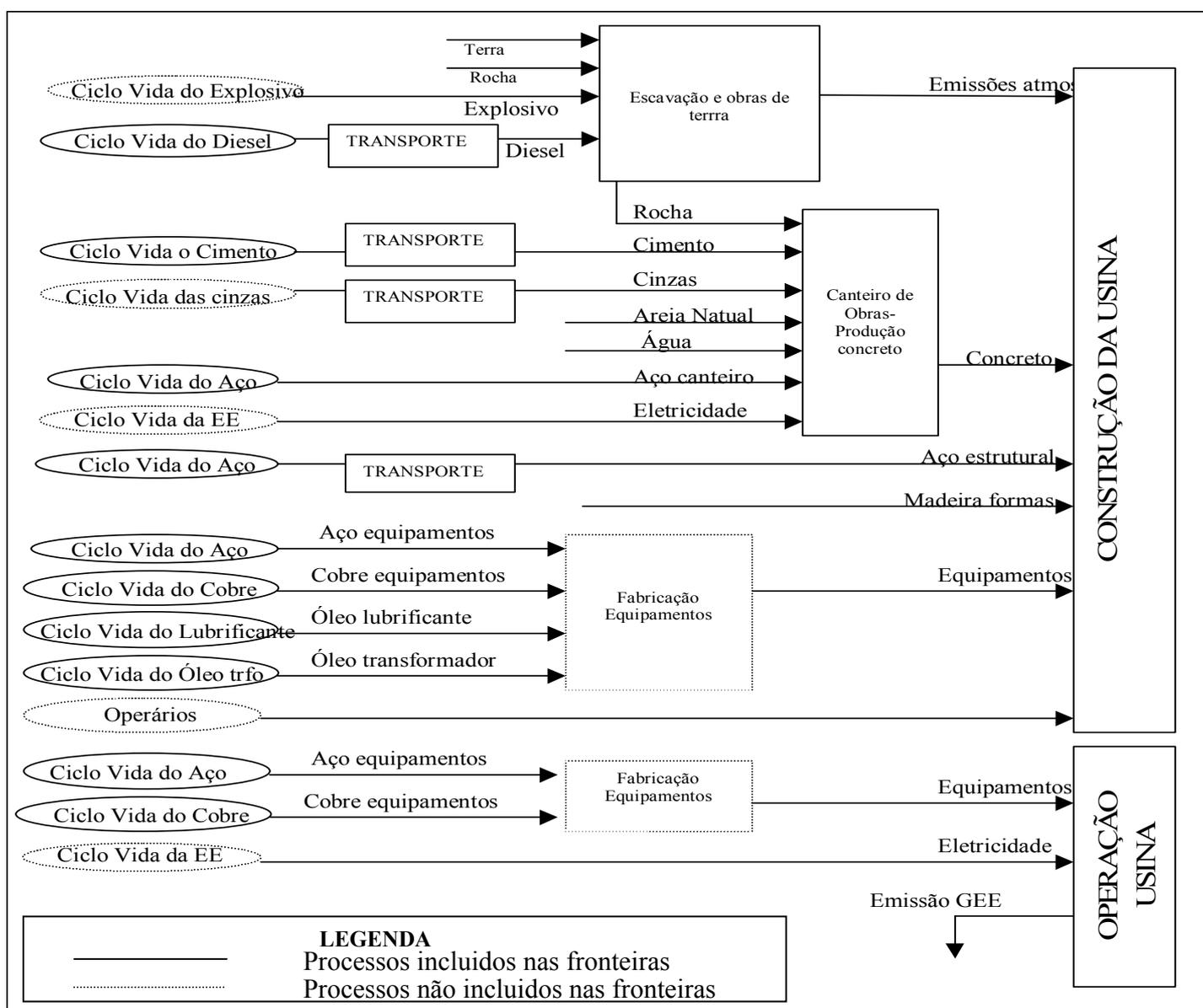


Figura 5.02- Fronteiras do sistema de produto de Itaipu.

c) Coleta de dados

Conforme apresentado no Capítulo 4, a coleta de dados deste estudo foi dividida em duas partes, uma primeira referente aos processos integrantes do ciclo de vida da usina de Itaipu, conforme apresentado na Figura 5.02, e uma segunda parte onde são estimados os processos do ciclo de vida dos insumos utilizados por estes processos. A seguir são apresentadas, de modo bastante resumido, as fontes de dados e principais hipóteses para cada caso. Para informações detalhadas de como cada valor foi obtido, recomenda-se a leitura dos Anexos D e E, onde estas informações são devidamente apresentadas.

d) Estimativa dos processos do ciclo de vida de Itaipu

No decorrer da etapa de estudo do modelo grande volume de informação foi coletada. Dentre estas, deu-se preferência a valores que passaram diretamente por técnicos da própria empresa (DALMI, 2002; FABRO, LIMA, 2002; MESCOLIN, 2002; ZENHPFENNIG, 2003), sendo estes referentes principalmente aos consumos de materiais utilizados para a produção do concreto da usina, etapas de transporte de materiais e aspectos relacionados à formação do reservatório.

Em seguida, de modo complementar, foram levantados dados na literatura disponível sobre a usina, em diversas publicações da própria empresa (ITAIPU BINACIONAL, 1977; 1978; 1979; 1980; 1981a; 1981b; 1982; 1983; 1984; 1985; 1987; 1989; 1994; 2000; 2001a; 2001b; 2002; 2003; s/d), e de periódicos, livros e artigos sobre a usina (BRAGA, SONADA, 1983; CAVALCANTI, 1979; CRUZ, 1996; REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983; THEMAG, 1982, UNICON, 1978a, 1978b).

Além destas fontes bibliográfica, em alguns momentos recorreu-se à consultas pessoais com especialistas na área, muitos deles que atuaram na obra da usina (ANASTÁCIO, 2002; ANDRIOLO, 2002, ROISENBLATT, 2003; UEHARA, 2002; CUNHA, 2002).

Muitas vezes no entanto não foram encontrados os dados necessários, e nestes casos fez-se uma escolha entre três possibilidades, variando caso a caso qual a alternativa adotada:

- não incluir o dado, apenas apontando a necessidade de futuramente avaliar sua possível relevância;
- aproximar o dado usando uma informação de um processo similar de outra realidade;
- buscar métodos de aproximação por modelo matemático, estimando valores.

Para as duas últimas alternativas, procedeu-se ao levantamento de informações de outras fontes, utilizando para tanto contatos pessoais diversos (com as concessionárias das usinas, órgãos do governo, empreiteiras, fornecedores, entidades de classe, etc envolvidos com o tema) e dados de literatura de realidades semelhantes às encontradas na obra.

Como anteriormente comentado, os dados, estimativas e hipóteses referentes a este levantamento encontram-se no Anexo D, ao final do qual apresenta-se na Tabela D.70 a consolidação destas estimativas por processo, para os 100 anos de operação da usina.

De modo a permitir uma melhor compreensão dos aspectos ambientais do ciclo de vida de Itaipu, sua posterior comparação com outros estudos e uma mais fácil atualização de dados dos insumos em futuros estudos, realizou-se uma nova consolidação, desta vez por consumo ou emissão. A Tabela 5.01 apresenta estes valores consolidados tanto para os 100 anos de operação como já calculados por unidade funcional (geração de 1 MWh).

Tabela 5.01 Consolidação das estimativas do ciclo de vida de Itaipu.

	Total para os 100 anos				Valores por MWh			
	UNIDADE	CONSTRUÇÃO	OPERAÇÃO	TOTAL	UNIDADE	CONSTRUÇÃO	OPERAÇÃO	TOTAL
Consumo recursos								
Rocha	m3	3,20E+07	0,00E+00	3,20E+07	m ³ / MWh	3,59E-03	0,00E+00	3,59E-03
Terra	m3	2,36E+07	0,00E+00	2,36E+07	m ³ / MWh	2,65E-03	0,00E+00	2,65E-03
Água	t	2,16E+06	0,00E+00	2,16E+06	t/ MWh	2,42E-04	0,00E+00	2,42E-04
Areia	t	3,68E+06	0,00E+00	3,68E+06	t/ MWh	4,12E-04	0,00E+00	4,12E-04
Madeira	t	5,27E+03	0,00E+00	5,27E+03	t/ MWh	5,91E-07	0,00E+00	5,91E-07

(continua)

Tabela 5.01- (continuação)

	Total para os 100 anos				Valores por MWh			
	UNIDADE	CONSTRUÇÃO	OPERAÇÃO	TOTAL	UNIDADE	CONSTRUÇÃO	OPERAÇÃO	TOTAL
Consumo insumos								
Eletricidade	MWh	2,64E+06	4,73E+02	2,64E+06	MWh/ MWh	2,96E-04	5,31E-08	2,96E-04
Cimento	t	2,48E+06	0	2,48E+06	t/ MWh	2,78E-04	0,00E+00	2,78E-04
Cinzas	t	3,00E+05	0	3,00E+05	t/ MWh	3,36E-05	0,00E+00	3,36E-05
Aço	t	7,97E+05	4,69E+05	1,27E+06	t/ MWh	8,94E-05	5,26E-05	1,42E-04
Cobre	t	5,48E+03	1,63E+04	2,18E+04	t/ MWh	6,15E-07	1,83E-06	2,45E-06
Diesel	t	2,95E+05	0,00E+00	2,95E+05	t/ MWh	3,31E-05	0,00E+00	3,31E-05
Óleo transf.	m3	3,37E+03	0,00E+00	3,37E+03	m ³ / MWh	3,78E-07	0,00E+00	3,78E-07
Óleo lubrif.	m3	1,50E+03	0,00E+00	1,50E+03	m ³ / MWh	1,68E-07	0,00E+00	1,68E-07
Transportes								
Transp. Caminhão	t.km	3,90E+09	0,00E+00	3,90E+09	t.km/ MWh	4,37E-01	0,00E+00	4,37E-01
Transp. Ônibus	km	1,50E+07	0,00E+00	1,50E+07	km/ MWh	1,68E-03	0,00E+00	1,68E-03
Emissões Atmosféricas								
Aldeídos	t	3,03E+02	0	3,03E+02	t/ MWh	3,40E-08	0,00E+00	3,40E-08
CH4	t	0,00E+00	1,18E+06	1,18E+06	t/ MWh	0,00E+00	1,32E-04	1,32E-04
CO	t	4,62E+03	0	4,62E+03	t/ MWh	5,18E-07	0,00E+00	5,18E-07
CO2	t	9,26E+05	9,64E+06	1,06E+07	t/ MWh	1,04E-04	1,08E-03	1,19E-03
Hidrocarbonetos	t	8,45E+02	0	8,45E+02	t/ MWh	9,48E-08	0,00E+00	9,48E-08
Particulado	t	8,74E+02	0	8,74E+02	t/ MWh	9,80E-08	0,00E+00	9,80E-08
NOx	t	1,26E+04	0	1,26E+04	t/ MWh	1,41E-06	0,00E+00	1,41E-06
SOx	t	1,30E+03	0	1,30E+03	t/ MWh	1,46E-07	0,00E+00	1,46E-07
Aspectos não materiais								
Uso do solo	km2	0,00E+00	1,35E+03	1,35E+03	Km ² / MWh	0,00E+00	1,51E-07	1,51E-07

e) Estimativa dos processos dos ciclos de vida dos insumos

Conforme exposto anteriormente, e seguindo as recomendações do Capítulo 5.3, elaborado a partir da experiência internacional, decidiu-se incluir neste estudo os ciclos de vida dos principais insumos da usina de Itaipu, a saber: energia elétrica, transportes de ônibus, caminhão, trem de carga, navio petroleiro, navio de carga a granel, produção de cimento, aço, cobre, óleo diesel e óleos lubrificante e de transformador.

Devido à inexistência de bases de dados nacionais para estes insumos, buscou-se construir um conjunto de estimativas que, em cada caso específico, melhor se aproximasse das condições produtivas dos insumos à época da obra, tendo como base o ano de 1977, data de início das principais obras civis.

Uma vez que o mesmo problema de informações sobre os insumos foi encontrado nos outros dois trabalhos integrantes do projeto no qual este estudo se insere, ICV da transmissão de eletricidade e ICV da distribuição de eletricidade no Brasil, procurou-se antes buscar outras bases de dados, em cada caso avaliar as bases utilizadas por estes, que na verdade se constituem de modificações realizadas pelo pesquisador Alexandre Yokote (YOKOTE, 2003), do GP2, a partir de bases de dados internacionais.

A seguir apresenta-se, de modo muito sucinto, a abordagem da estimativa do ciclo de vida para cada insumo considerado. Para acompanhamento do cálculo e referência às fontes de informação, indica-se a leitura dos capítulos específicos do Anexo E. Ao final das considerações, a Tabela 5.02 apresenta os valores consolidados do ICV de cada um destes insumos.

- Derivados de petróleo

Tanto o óleo diesel utilizado por máquinas, caminhões e ônibus, como o óleo lubrificante e de transformador dos equipamentos de construção civil, e os demais consumos de óleo diesel e combustível para obtenção dos insumos, são obtidos no mesmo processo, de refino do petróleo. Desta forma, a estimativa que fornece os inventários destes é a mesma.

Cabe citar, como descrito no Anexo E, que o óleo de transformador será admitido como proveniente do óleo lubrificante, sem que seja admitido nenhum aspecto ambiental particular, embora hajam alguns processos adicionais.

A estimativa neste caso foi baseada em dados obtidos por YOKOTE (2003) para o processo de refino, com características de operação de uma refinaria obtidos de bases internacionais, sobre o qual foi aplicado o perfil de refino brasileiro.

A origem do petróleo no entanto, e conseqüentemente seu processo de obtenção e transporte, foram estimados especificamente para a época considerada neste estudo, uma vez que YOKOTE (2003) trabalha com dados de 2003.

A Tabela 5.02 apresenta o inventário consolidado dos derivados de petróleo utilizados neste estudo, por quilograma de derivado, de acordo com a Tabela E.03, do Anexo E.

- Eletricidade

No caso da eletricidade, tem-se que a matriz elétrica brasileira se modificou consideravelmente desde a década de setenta. Desta forma, utilizou-se dados oficiais da composição do sistema de geração brasileiro para a época, sobre os quais se modelou a geração baseada nas tecnologias hidrelétrica e termelétrica.

No caso da hidrelétrica, não foi admitido nenhum aspecto ambiental específico, sendo apenas contabilizado um fluxo, tido como elementar, de “energia hidrelétrica”.

Para a geração termelétrica no entanto, admitiu-se a composição de combustíveis da época, com o perfil de queima (poder calorífico e emissões) dados por fatores internacionais, à exceção do carvão que teve seu poder calorífico corrigido para valores do carvão brasileiro. Adicionalmente, foi considerada também uma perda de 3,0% da eletricidade devido à transmissão.

Estes procedimentos foram realizados seguindo a metodologia de YOKOTE (2003), mas utilizando valores da época de construção da usina.

A Tabela 5.02 reproduz a Tabela E.07, do Anexo E, onde é apresentado o inventário de ciclo de vida da eletricidade transmitida em 1977 no Brasil, por kWh transmitido.

- Transportes

Neste estudo foram considerados quatro tipos de transporte: ônibus, caminhão, trem e navio. Para o caso dos transportes em ônibus, caminhão e trem utilizou-se fatores de consumo de diesel e emissão de poluentes da literatura disponibilizada pelo governo britânico, enquanto que para o transporte de navio foram usadas bases de dados de ACV, uma para petroleiro e outra para navios de carga de granel.

Exceto para os ônibus, todos os demais transportes trabalham com valores em t.km. Este procedimento não foi adotado para os ônibus apenas por não ser adequado para contabilização de transporte de pessoas, e os cálculos neste caso são realizados por distância percorrida.

Cabe também afirmar que os valores por t.km para os dois tipos de navio são equivalentes, o que faz com que se possa apresentar apenas um valor de fatores para o transporte marítimo, válido em ambos os casos.

A Tabela 5.02 apresenta os valores da Tabela E.14, do Anexo E, que fornece os fatores de consumo de diesel e emissão de poluentes para cada tipo de transporte considerado.

- Cimento

Para poder realizar as estimativas referentes à base de dados do cimento, primeiramente estudou-se seu processo produtivo e as condições tecnológicas da indústria cimenteira nacional em 1977. Neste processo pode-se concluir que a produção de cimento pode ser realizada por duas vias distintas: a úmida e a seca. Tendo em vista diferenças substanciais entre as duas rotas, principalmente no consumo energético, e considerando a particularidade brasileira na contribuição de cada rota na produção nacional, verificou-se que o uso de bases internacionais, mesmo as modificadas por YOKOTE (2003), poderia induzir a desvios consideráveis.

Assim, utilizou-se a identificação de aspectos de YOKOTE (2003) para subsidiar uma quantificação dos mesmos adequada à época de construção da usina, a partir de dados de literatura.

A Tabela 5.02 apresenta os resultados finais do ICV do cimento para este caso, reproduzindo os valores da Tabela E.20, do Anexo E.

- Aço

Do mesmo modo que para o cimento, no caso do aço realizou-se um estudo do processo produtivo, suas diferentes rotas e a participação de cada uma na indústria siderúrgica brasileira na década de setenta. Este estudo permitiu constatar que os dados utilizados por YOKOTE (2003) não se adequam ao caso da usina de Itaipu, principalmente por não considerarem o uso de carvão vegetal e por possuírem distribuição entre as rotas de produção distintas da indústria siderúrgica nacional em 1977.

Assim, decidiu-se construir desde o princípio uma base de dados para a obtenção do aço laminado, adequada às condições brasileiras da época. Este procedimento, realizado com literatura específica, resultou no inventário apresentado na Tabela 5.02, que reproduz a Tabela E.31, do Anexo E.

- Cobre

Para o caso do cobre, foi admitida a mesma hipótese de YOKOTE (2003), de produção totalmente importada, fato confirmado com estatísticas setoriais da época. Desta forma, utilizou-se a base de YOKOTE (2003), modificada a partir de um banco de dados de ACV internacional, modificando apenas o transporte.

A Tabela 5.02 apresenta o inventário do cobre, segundo a Tabela E.32 do Anexo E.

Tabela 5.02- Consolidação dos ICVs dos insumos de Itaipu

	Unid.	Óleo Diesel	Óleo Combustível	Óleo Lubrificante	Transp. Caminhão	Transp. Ferroviário	Transp. Marítimo	Transp. Ônibus	Escavações e Obras Terra	Eletricidade transmitida	Aço	Cimento	Cobre
		(/ kg diesel)	(/ kg óleo comb.)	(/ kg óleo lubrif.)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ km)	(/ usina)	(/ MJ)	(/ kg aço)	(/ kg cimento)	(/ kg cobre)
Consumo de Recursos													
Água	kg	3,28E-02	3,08E-02	3,29E-02	1,79E-04	3,15E-08	2,62E-04	7,88E-06	9,74E+06	1,50E-04	3,36E+01	1,41E+01	2,81E+00
Ar	kg										8,79E-05		
Argila	kg	3,92E-05	3,68E-05	3,93E-05	2,14E-07	3,76E-11	3,13E-07	9,41E-09	1,16E+04	1,79E-07	7,98E-06	3,00E-01	1,04E-06
Basalto	m3								3,20E+07				
Bauxita	kg	4,12E-04	3,87E-04	4,14E-04	2,25E-06	3,96E-10	3,29E-06	9,90E-08	1,22E+05	1,88E-06	8,40E-05	4,72E-05	1,10E-05
Calcita	kg	1,96E-04	1,84E-04	1,97E-04	1,07E-06	1,88E-10	1,56E-06	4,70E-08	5,81E+04	8,95E-07	3,13E-01	1,59E+00	5,22E-06
Carvão	kg									7,98E-04	3,75E-01	4,09E-04	3,96E-01
Dolomita	kg										6,87E-03		
Energia (inespec.)	MJ	4,47E-01	4,19E-01	4,48E-01	2,44E-03	4,28E-07	3,57E-03	1,07E-04	1,33E+08	2,04E-03	9,10E-02	5,12E-02	1,19E-02
En. Carvão	MJ	9,80E-03	9,19E-03	9,84E-03	5,36E-05	9,40E-09	7,82E-05	2,35E-06	2,91E+06	4,48E-05	2,00E-03	1,12E-03	2,61E-04
En. Gás natural	MJ	2,60E+00	2,44E+00	2,61E+00	1,42E-02	2,49E-06	2,07E-02	6,23E-04	7,70E+08	1,19E-02	5,29E-01	2,97E-01	6,91E-02
En. hidrelétrica	MJ	9,80E-03	9,19E-03	9,84E-03	5,36E-05	9,40E-09	7,82E-05	2,35E-06	2,91E+06	9,60E-01	1,75E+00	4,93E-01	3,32E+00
En. Petróleo	MJ	6,27E-01	5,88E-01	6,30E-01	3,43E-03	6,01E-07	5,00E-03	1,51E-04	1,86E+08	2,87E-03	1,28E-01	7,18E-02	1,67E-02
En. Urânio	MJ	9,80E-03	9,19E-03	9,84E-03	5,36E-05	9,40E-09	7,82E-05	2,35E-06	2,91E+06	4,48E-05	2,00E-03	1,12E-03	2,61E-04
Fluorita	kg										4,69E-03		
Gás Natural	kg	2,82E-03	2,64E-03	2,83E-03	1,54E-05	2,70E-09	2,25E-05	6,76E-07	8,36E+05	1,29E-05	5,74E-04	3,22E-04	2,71E-01
Gipsita	kg											3,00E-02	
Madeira	kg										1,01E+00		
Min. Cobre	kg												8,90E-01
Min. Ferro	kg	1,96E-04	1,84E-04	1,97E-04	1,07E-06	1,88E-10	1,56E-06	4,70E-08	5,81E+04	8,95E-07	1,18E+00	2,24E-05	5,22E-06
Min. Manganês	kg										9,00E-03		

(continua)

Tabela 5.02- (continuação)

	Unid.	Óleo Diesel	Óleo Combustível	Óleo Lubrificante	Transp. Caminhão	Transp. Ferroviário	Transp. Marítimo	Transp. Ônibus	Escavações e Obras Terra	Eletricidade transmitida	Aço	Cimento	Cobre
		(/ kg diesel)	(/ kg óleo comb.)	(/ kg óleo lubrif.)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ km)	(/ usina)	(/ MJ)	(/ kg aço)	(/ kg cimento)	(/ kg cobre)
Petróleo	kg	1,19E+00	1,11E+00	1,19E+00	6,49E-03	1,14E-06	9,47E-03	2,85E-04	3,52E+08	5,42E-03	2,42E-01	1,36E-01	1,60E+00
Quartzita	kg										1,80E-02		
Sal gema	kg	1,96E-04	1,84E-04	1,97E-04	1,07E-06	1,88E-10	1,56E-06	4,70E-08	5,81E+04	8,95E-07	3,99E-05	2,24E-05	5,22E-06
Sucata aço	kg										4,63E-01		
Sucata cobre	kg												1,30E-01
Terra	m3								2,36E+07				
Emissões atmosféricas													
1,3 Butadieno	kg				1,90E-07	2,97E-07		7,20E-09	5,82E+01		2,25E-07	4,66E-08	6,74E-08
Aldeídos	kg								3,03E+05				
Amônia	kg										1,51E-06		1,59E-06
Benzeno	kg				3,02E-05	6,45E-09		2,81E-08	9,25E+03		8,03E-06	7,40E-06	1,04E-06
Benzopireno	kg										1,68E-08		1,78E-08
CaO	kg										8,60E-03		
CH4	kg	4,50E-05	4,22E-05	4,52E-05	2,35E-06	9,59E-14	3,59E-07	7,38E-08	1,40E+04	2,06E-07	4,98E-03	5,67E-06	1,23E-06
Chumbo	kg					1,92E-10					1,17E-10		4,36E-11
CO	kg	1,48E-03	1,39E-03	1,48E-03	6,81E-05	4,68E-06	8,18E-05	4,24E-06	5,08E+06	9,68E-06	7,89E-01	1,86E-04	3,06E-03
CO2	kg	6,74E-01	6,32E-01	6,77E-01	2,19E-02	8,23E-04	2,85E-02	9,64E-04	1,13E+09	2,08E-02	4,64E-01	9,42E-01	7,34E+00
COV	kg				5,00E-05			1,41E-06	1,53E+04		1,67E-03	1,23E-05	
COV-exceto CH4	kg	1,13E-03	1,06E-03	1,14E-03	6,20E-06	3,43E-06	9,05E-06	2,72E-07	3,36E+05	5,18E-06	2,33E-04	1,30E-04	3,10E-05
Etano	kg										2,62E-04		
F2	kg										5,33E-07		5,64E-07
FeO	kg										5,80E-03		
Fluoretano	kg										1,68E-07		1,78E-07

(continua)

Tabela 5.02- (continuação)

	Unid.	Óleo Diesel	Óleo Combustível	Óleo Lubrificante	Transp. Caminhão	Transp. Ferroviário	Transp. Marítimo	Transp. Ônibus	Escavações e Obras Terra	Eletricidade transmitida	Aço	Cimento	Cobre
		(/ kg diesel)	(/ kg óleo comb.)	(/ kg óleo lubrif.)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ km)	(/ usina)	(/ MJ)	(/ kg aço)	(/ kg cimento)	(/ kg cobre)
Fluoreto	kg										1,20E-05	1,20E-07	
Fuligem	kg	1,37E-05	1,29E-05	1,38E-05	6,57E-05	7,20E-07	8,09E-07	2,90E-06	2,42E+04	8,47E-06	1,27E-04	2,22E-05	9,94E-05
H2	kg	4,66E-06	4,37E-06	4,68E-06	2,55E-08	4,47E-12	3,72E-08	1,12E-09	1,38E+03	2,13E-08	1,29E-03	5,33E-07	1,24E-07
H2S	kg	1,81E-06	1,69E-06	1,81E-06	9,88E-09	1,73E-12	1,44E-08	4,34E-10	5,36E+02	8,25E-09	7,61E-05	2,07E-07	8,02E-05
Hidrocarbonetos	kg	2,54E-03	2,39E-03	2,55E-03	1,39E-05	2,44E-09	6,03E-05	6,10E-07	1,60E+06	1,54E-05	8,26E-04	2,94E-04	3,57E-04
Hidrocarb. Alifát.	kg	3,54E-04	3,32E-04	3,55E-04	1,94E-06	3,40E-10	2,83E-06	8,50E-08	1,05E+05	1,62E-06	7,21E-05		9,42E-06
Hidrocarb.Aromát	kg										2,27E-06	4,05E-05	2,41E-06
HCl	kg	5,12E-07	4,80E-07	5,14E-07	2,80E-09	4,91E-13	4,09E-09	1,23E-10	1,52E+02	2,34E-09	1,04E-07	5,86E-08	1,36E-08
Inespec.	kg										7,18E-05		7,60E-05
Mercúrio	kg										5,82E-14		2,18E-14
Metais pesados	kg	9,80E-07	9,19E-07	9,84E-07	5,36E-09	9,40E-13	7,82E-09	2,35E-10	2,91E+02	4,48E-09	2,00E-07	1,12E-07	2,61E-08
Metil- mercaptano	kg	1,39E-08	1,30E-08	1,39E-08	7,59E-11	1,25E-07	1,11E-10	3,33E-12	4,12E+00	6,34E-11	2,83E-09	1,59E-09	3,70E-10
N2O	kg				1,00E-06	1,33E-14		3,00E-08	3,06E+02		2,33E-07	2,45E-07	
NO2	kg									3,34E-05	6,19E-05	2,23E-05	1,39E-06
NOx	kg	1,10E-02	1,03E-02	1,10E-02	2,83E-04	1,75E-05	5,27E-04	1,16E-05	1,59E+07	5,01E-05	4,46E-03	1,31E-03	2,19E-02
Particul. (inesp.)	kg								8,74E+05		9,58E-02	4,16E-04	
Petróleo	kg	1,85E-04	1,73E-04	1,85E-04	1,01E-06	1,77E-10	1,47E-06	4,44E-08	5,48E+04	8,44E-07	3,76E-05	2,12E-05	4,92E-06
Poeira	kg	2,50E-04	2,35E-04	2,51E-04	1,37E-06	2,40E-10	2,00E-06	6,01E-08	7,43E+04	7,45E-06	6,93E-03	3,50E-02	6,92E-06
PM10	kg				1,36E-05	7,77E-07		6,04E-07	4,16E+03		1,47E-05	1,41E-03	1,76E-07
SO2	kg	7,41E-03	6,95E-03	7,44E-03	4,55E-05	2,54E-06	4,29E-04	1,98E-06	2,20E+06	3,39E-05	1,04E-02	8,50E-04	6,72E-01
SOx	kg	8,91E-04	8,36E-04	8,94E-04	4,87E-06	8,54E-10	7,11E-06	2,14E-07	1,56E+06	8,98E-05	3,40E-04	1,59E-04	2,73E-05
Tolueno	kg										7,30E-07		7,72E-07
Xileno	kg										7,86E-07		8,32E-07

(continua)

Tabela 5.02- (continuação)

	Unid.	Óleo Diesel	Óleo Combustível	Óleo Lubrificante	Transp. Caminhão	Transp. Ferroviário	Transp. Marítimo	Transp. Ônibus	Escavações e Obras Terra	Eletricidade transmitida	Aço	Cimento	Cobre
		(/ kg diesel)	(/ kg óleo comb.)	(/ kg óleo lubrif.)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ km)	(/ usina)	(/ MJ)	(/ kg aço)	(/ kg cimento)	(/ kg cobre)
Efluentes líquidos													
Ác. Acético	kg				1,61E-07	2,82E-11	2,35E-07	7,06E-09			4,11E-02		
Acetaldeído	kg										5,73E-04		
Acetona	kg										1,06E-03		
Ácido (H+)	kg	2,94E-05	2,76E-05	2,95E-05					8,72E+03	1,34E-07	5,99E-06	3,37E-06	7,82E-07
Alcatrão	kg										9,83E-02		
Amoníaco	kg										3,68E-07		
Chumbo	kg										2,81E-08		2,97E-08
Cianeto	kg										2,26E-06		
Cl-	kg	3,87E-05	3,63E-05	3,88E-05	2,12E-07	3,71E-11	3,09E-07	9,29E-09	1,15E+04	1,77E-07	7,88E-06	4,43E-06	1,03E-06
Cobre	kg										8,42E-09		8,91E-09
Cromo 3+	kg										1,04E-08		
DQO	kg	2,53E-06	2,38E-06	2,54E-06	1,38E-08	2,43E-12	2,02E-08	6,08E-10	7,51E+02	1,16E-08	5,16E-07	2,90E-07	6,74E-08
Fenol	kg	5,12E-08	4,80E-08	5,14E-08	2,80E-10	4,91E-14	4,09E-10	1,23E-11	1,52E+01	2,34E-10	3,78E-06	5,86E-09	1,36E-09
Ferro	kg										3,81E-05		
Fluoreto	kg										1,58E-05		
H2	kg	1,59E-06	1,49E-06	1,59E-06	8,68E-09	1,52E-12	1,27E-08	3,81E-10	4,71E+02	7,25E-09	3,23E-07	1,82E-07	4,23E-08
Hidrocarbonetos	kg	1,96E-05	1,84E-05	1,97E-05	1,07E-07	1,88E-11	1,56E-07	4,70E-09	5,81E+03	8,95E-08	5,39E-06	2,24E-06	2,01E-06
Hexano	kg										3,80E-07		
Inorgânicos gerais	kg												2,82E+00
Íons metálicos	kg	5,16E-06	4,84E-06	5,18E-06	2,82E-08	4,94E-12	4,11E-08	1,24E-09	1,53E+03	2,36E-08	1,05E-06	5,90E-07	1,37E-07
Manganês	kg										8,14E-07		

(continua)

Tabela 5.02- (continuação)

	Unid.	Óleo Diesel	Óleo Combustível	Óleo Lubrificante	Transp. Caminhão	Transp. Ferroviário	Transp. Marítimo	Transp. Ônibus	Escavações e Obras Terra	Eletricidade transmitida	Aço	Cimento	Cobre
		(/ kg diesel)	(/ kg óleo comb.)	(/ kg óleo lubrif.)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ km)	(/ usina)	(/ MJ)	(/ kg aço)	(/ kg cimento)	(/ kg cobre)
Mercúrio	kg										1,68E-09		1,78E-09
Metanol	kg										1,49E-02		
Metil acetato	kg										1,31E-03		
N total	kg										2,81E-07		2,97E-07
NH3	kg										3,37E-05		
Nitrato	kg										3,36E-05		
Óleo	kg	8,45E-06	7,92E-06	8,48E-06	4,62E-08	8,10E-12	6,74E-08	2,03E-09	2,51E+03	3,86E-08	9,06E-05	9,67E-07	2,25E-07
Orgân. dissolvidos	kg	1,96E-05	1,84E-05	1,97E-05	1,07E-07	1,88E-11	1,56E-07	4,70E-09	5,81E+03	8,95E-08	3,99E-06	2,24E-06	5,22E-07
PAH	kg										2,81E-09		2,97E-09
Petróleo	kg	2,29E-05	2,15E-05	2,30E-05	1,25E-07	2,20E-11	1,83E-07	5,51E-09	6,81E+03	1,05E-07	4,67E-06	2,63E-06	6,11E-07
Sódio	kg	1,94E-05	1,82E-05	1,94E-05	1,06E-07	1,86E-11	1,54E-07	4,65E-09	5,74E+03	8,84E-08	3,94E-06	2,22E-06	5,15E-07
Sól. dissolvidos	kg										4,46E-05		
Sólidos suspensos	kg										1,36E-04		
Subst. Dissolvidas	kg				5,36E-08	9,40E-12	7,82E-08	2,35E-09	2,91E+03	4,48E-08	2,00E-06	1,12E-06	2,61E-07
Subst. Suspensas	kg				3,75E-07	6,58E-11	5,47E-07	1,65E-08	2,04E+04	3,13E-07	1,40E-05	7,85E-06	1,83E-06
Sulfato	kg	9,80E-06	9,19E-06	9,84E-06									
Sulfito	kg	6,86E-05	6,44E-05	6,89E-05							2,52E-06		
Zinco	kg										1,26E-04		2,08E-08
Resíduos sólidos													
Inorgânico geral	kg												1,34E+02
Escória	kg	5,12E-07	4,80E-07	5,14E-07	2,80E-09	4,91E-13	4,09E-09	1,23E-10	1,52E+02	2,34E-09	1,04E-07	5,86E-08	1,36E-08

(continua)

Tabela 5.02- (continuação)

	Unid.	Óleo Diesel	Óleo Combustível	Óleo Lubrificante	Transp. Caminhão	Transp. Ferroviário	Transp. Marítimo	Transp. Ônibus	Escavações e Obras Terra	Eletricidade transmitida	Aço	Cimento	Cobre
		(/ kg diesel)	(/ kg óleo comb.)	(/ kg óleo lubrif.)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ km)	(/ usina)	(/ MJ)	(/ kg aço)	(/ kg cimento)	(/ kg cobre)
Lodo	kg										1,50E-02		
Resíduo aciaria	kg										4,00E-02		
Res. inorgânico	kg												
Resíduo mineral	kg	5,63E-05	5,28E-05	5,65E-05	3,08E-07	5,40E-11	4,50E-07	1,35E-08	1,67E+04	2,57E-07	1,15E-05	6,45E-06	1,50E-06
Resíduo não inerte	kg	1,47E-03	1,38E-03	1,48E-03	8,04E-06	1,41E-09	1,17E-05	3,53E-07	4,36E+05	6,71E-06	2,99E-04	1,68E-04	3,91E-05
Resíduo sólido	kg										3,85E-05	1,96E-04	
Aspectos não materiais													
Perda calor (ar)	MJ									3,09E-02	5,63E-02	1,59E-02	1,29E-03
Perda calor (água)	MJ									1,59E-01	2,90E-01	8,16E-02	6,61E-03
Uso do solo	m2	1,05E-06	9,90E-07	1,06E-06	5,77E-09	1,01E-12	8,42E-09	2,53E-10	3,13E+02	4,82E-09	7,30E-03	1,21E-07	1,75E-02

5.2.2 Procedimento de cálculo

Para finalizar a etapa de inventário procedeu-se à sua consolidação, que foi realizada adequando os resultados obtidos nas Tabelas 5.01 e 5.02 ao formato final do ICV. Para tanto, como já comentado, utilizou-se o programa SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003).

O ICV de Itaipu foi consolidado obedecendo os processos descritos nos Anexos D e E, e relacionados nos itens anteriores deste Capítulo. Basicamente o que se procedeu foi modelar as estimativas dos processos de Itaipu segundo a Figura D.03, no final do Anexo D, obtendo os valores apresentados na Tabela 5.01. Em seguida, modelou-se os processos dos ciclos de vida dos insumos que alimentam estes processos segundo as estimativas dos processos do Anexo E, obtendo em cada caso os resultados apresentado pela Tabela 5.02.

A Tabela 5.03 a seguir apresenta o resultado final deste processo de consolidação, o Inventário da Usina de Itaipu, principal produto deste trabalho.

Tabela 5.03- ICV de Itaipu consolidado.

	Unidade (/ MWh)	Total	CONSTRUÇÃO USINA	OPERAÇÃO USINA (100 anos)
Consumo de recursos materiais				
Água	kg	8,90E+00	7,16E+00	1,74E+00
Ar	kg	1,24E-05	7,86E-06	4,55E-06
Areia	kg	4,12E-01	4,12E-01	x
Argila	kg	8,34E-02	8,34E-02	4,15E-07
Basalto	m3	3,59E-03	3,59E-03	x
Bauxita	kg	4,00E-05	3,56E-05	4,36E-06
Calcita	kg	4,86E-01	4,70E-01	1,62E-02
Carvão	kg	5,40E-02	3,39E-02	2,01E-02
Dolomita	kg	9,69E-04	6,14E-04	3,55E-04
Fluorita	kg	6,63E-04	4,20E-04	2,43E-04
Petróleo	kg	1,19E-01	1,04E-01	1,51E-02
Gas Natural	kg	8,84E-04	4,10E-04	4,74E-04
Gipsita	kg	8,33E-03	8,33E-03	x
Madeira	kg	1,44E-01	9,13E-02	5,25E-02
Min. Cobre	kg	2,01E-03	5,47E-04	1,46E-03
Min. Ferro	kg	1,66E-01	1,05E-01	6,10E-02
Min. Manganês	kg	1,27E-03	8,04E-04	4,65E-04
Quartzita	kg	2,54E-03	1,61E-03	9,31E-04
Sal gema	kg	1,90E-05	1,69E-05	2,07E-06
Sucata aço	kg	6,53E-02	4,14E-02	2,39E-02
Sucata cobre	kg	2,93E-04	7,99E-05	2,13E-04
Terra	m3	2,65E-03	2,65E-03	x

(continua)

Tabela 5.03-(continuação)

	Unidade (/ MWh)	Total	CONSTRUÇÃO USINA	OPERAÇÃO USINA (100 anos)
Consumo de recursos energéticos				
Energia (inespec.)	MJ	4,33E-02	3,86E-02	4,73E-03
Energia do carvão	MJ	9,50E-04	8,46E-04	1,04E-04
Energia gás natural	MJ	2,52E-01	2,24E-01	2,75E-02
Energia do petróleo	MJ	6,08E-02	5,42E-02	6,63E-03
Energia do urânio	MJ	9,50E-04	8,46E-04	1,04E-04
Energia hidrelétrica	MJ	1,46E+00	1,36E+00	9,61E-02
Emissões atmosféricas				
1,3 Butadieno	kg	1,40E-07	1,28E-07	1,17E-08
Aldeídos	kg	3,40E-05	3,40E-05	x
Amônia	kg	2,16E-07	1,36E-07	8,06E-08
Benzeno	kg	1,64E-05	1,60E-05	4,17E-07
Benzopireno	kg	2,42E-09	1,52E-09	9,00E-10
CaO	kg	1,21E-03	7,69E-04	4,45E-04
CH4	kg	1,32E-01	4,50E-04	1,32E-01
Chumbo	kg	1,65E-11	1,04E-11	6,10E-12
CO	kg	1,12E-01	7,12E-02	4,08E-02
CO2	kg	1,56E+00	4,45E-01	1,12E+00
COV	kg	2,64E-04	1,77E-04	8,66E-05
COV exceto metano	kg	1,10E-04	9,81E-05	1,21E-05
Etano	kg	3,70E-05	2,34E-05	1,36E-05
F2	kg	7,65E-08	4,80E-08	2,85E-08
FeO	kg	8,18E-04	5,18E-04	3,00E-04
Fluoreto	kg	2,42E-08	1,52E-08	9,00E-09
Fluoreto	kg	1,72E-06	1,10E-06	6,19E-07
Fuligem	kg	5,84E-05	5,16E-05	6,73E-06
H2	kg	1,83E-04	1,16E-04	6,70E-05
H2S	kg	1,10E-05	6,98E-06	4,07E-06
HCl	kg	4,97E-08	4,42E-08	5,42E-09
Hidrocarbonetos	kg	3,86E-04	3,43E-04	4,33E-05
Hidroc. Alifáticos	kg	3,43E-05	3,06E-05	3,75E-06
Hidroc. Aromáticos	kg	3,26E-07	2,05E-07	1,22E-07
Inespec.	kg	1,03E-05	6,47E-06	3,84E-06
Material particulado	kg	1,37E-02	8,78E-03	4,96E-03
Mercúrio	kg	8,27E-15	5,22E-15	3,05E-15
Metais Pesados	kg	9,50E-08	8,46E-08	1,04E-08
Metil- mercaptano	kg	1,35E-09	1,20E-09	1,47E-10
N2O	kg	5,89E-07	5,77E-07	1,21E-08
NO2	kg	1,49E-05	1,17E-05	3,20E-06
NOx	kg	2,97E-03	2,70E-03	2,67E-04
Petróleo	kg	1,79E-05	1,60E-05	1,95E-06
PM10	kg	4,01E-04	4,01E-04	7,62E-07
Poeira (SPM)	kg	1,07E-02	1,04E-02	3,59E-04
SO2	kg	3,49E-03	1,85E-03	1,64E-03
SOx	kg	2,70E-04	2,53E-04	1,76E-05
Tolueno	kg	1,05E-07	6,57E-08	3,90E-08
Xileno	kg	1,13E-07	7,07E-08	4,20E-08

(continua)

Tabela 5.03- (continuação)

	Unidade (/ MWh)	Total	CONSTRUÇÃO USINA	OPERAÇÃO USINA (100 anos)
Efluentes líquidos				
Ác. Acético	kg	5,80E-03	3,68E-03	2,13E-03
Acetaldeído	kg	8,09E-05	5,12E-05	2,96E-05
Acetona	kg	1,50E-04	9,52E-05	5,51E-05
Ácido (H+)	kg	2,85E-06	2,54E-06	3,11E-07
Alcatrão	kg	1,39E-02	8,79E-03	5,08E-03
Amoníaco	kg	5,19E-08	3,29E-08	1,90E-08
Chumbo	kg	4,03E-09	2,53E-09	1,50E-09
Cianeto	kg	3,18E-07	2,02E-07	1,17E-07
Cl-	kg	3,75E-06	3,34E-06	4,09E-07
Cobre	kg	1,21E-09	7,58E-10	4,50E-10
Cromo 3+	kg	1,47E-09	9,32E-10	5,39E-10
DQO	kg	2,46E-07	2,19E-07	2,68E-08
Fenol	kg	5,37E-07	3,41E-07	1,95E-07
Ferro	kg	5,38E-06	3,41E-06	1,97E-06
Fluoreto	kg	2,23E-06	1,41E-06	8,16E-07
H2	kg	1,54E-07	1,37E-07	1,68E-08
Hexano	kg	5,36E-08	3,40E-08	1,97E-08
Hidrocarbonetos	kg	2,10E-06	1,82E-06	2,82E-07
Inorgânicos gerais	kg	6,36E-03	1,73E-03	4,63E-03
Íons metálicos	kg	5,00E-07	4,45E-07	5,45E-08
Manganês	kg	1,15E-07	7,28E-08	4,21E-08
Mercurio	kg	2,42E-10	1,52E-10	9,00E-11
Metanol	kg	2,10E-03	1,33E-03	7,71E-04
Metil acetato	kg	1,85E-04	1,17E-04	6,78E-05
N total	kg	4,03E-08	2,53E-08	1,50E-08
NH3	kg	4,76E-06	3,02E-06	1,75E-06
Nitrato	kg	4,75E-06	3,01E-06	1,74E-06
Óleo	kg	1,34E-05	8,67E-06	4,69E-06
Orgânicos dissolvidos	kg	1,90E-06	1,69E-06	2,07E-07
PAH	kg	4,03E-10	2,53E-10	1,50E-10
Petróleo	kg	2,22E-06	1,98E-06	2,43E-07
Sódio	kg	1,88E-06	1,67E-06	2,05E-07
Sólidos dissolvidos	kg	6,30E-06	3,99E-06	2,31E-06
Sólidos suspensos	kg	1,92E-05	1,21E-05	7,03E-06
Substâncias dissolvidas	kg	9,50E-07	8,46E-07	1,04E-07
Substâncias suspensas	kg	6,65E-06	5,93E-06	7,26E-07
Sulfito	kg	3,56E-07	2,25E-07	1,30E-07
Zinco	kg	1,78E-05	1,13E-05	6,53E-06
Resíduos sólidos				
Escória	kg	4,97E-08	4,42E-08	5,42E-09
Lodo	kg	2,12E-03	1,34E-03	7,76E-04
Resíduo aciaria	kg	5,65E-03	3,58E-03	2,07E-03
Resíduo inorgânico	kg	3,02E-01	8,24E-02	2,20E-01
Resíduo mineral	kg	5,46E-06	4,87E-06	5,96E-07
Resíduo não inerte	kg	1,43E-04	1,27E-04	1,56E-05
Resíduo sólido	kg	5,99E-05	5,79E-05	1,99E-06

(continua)

Tabela 5.03- (continuação)

	Unidade (/ MWh)	Total	CONSTRUÇÃO USINA	OPERAÇÃO USINA (100 anos)
Não materiais				
Perda calor (ar)	MJ	1,24E-02	9,44E-03	2,91E-03
Perda calor (água)	MJ	6,35E-02	4,85E-02	1,50E-02
Uso do solo	m2	1,52E-01	6,64E-04	1,52E-01

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Uma vez obtido o ICV consolidado para a usina de Itaipu, objetivo último deste trabalho, cabem algumas considerações acerca da qualidade, significado e interpretação dos aspectos obtidos. Desta forma, desenvolvem-se neste Capítulo uma série de discussões, sem no entanto realizar as respectivas conclusões, que se encontram consolidadas no Capítulo 7.

Para tanto, primeiramente fornece-se dados para que se adquira certa sensibilidade sobre o significado da grandeza da unidade funcional, o MWh. Em seguida, realiza-se um procedimento de agregação dos aspectos do ICV da Tabela 5.03, objetivando unificar valores de parâmetros idênticos ou semelhantes e que foram considerados em separado devido ao uso de diferentes bases de dados com origens distintas. Feito isso, desenvolve-se uma discussão sobre a sensibilidade destes aspectos ao horizonte de análise, demonstrando sua forte influência nos resultados, que prova cientificamente que as principais contribuições ao ciclo de vida se dão na etapa de construção da usina.

Em seguida a esta importante constatação, são levantados alguns valores do ciclo de vida para comparação com os estudos internacionais apresentados no Capítulo 3, e utilizados como base para as premissas deste estudo. Esta comparação vem comprovar a validade da ordem de grandeza dos dados inventariados, e permite algumas conclusões futuras.

De modo a atender o objetivo proposto de identificar os principais aspectos do ciclo de vida e os processos que a estes mais contribuem, aplica-se um critério de priorização para selecionar aspectos significativos, não necessariamente os únicos, e em seguida verifica-se quais os processos que mais contribuem a cada um destes. Ainda neste Capítulo são realizadas três comparações dos valores deste ICV com outras situações, de modo a atribuir uma ordem de grandeza aos valores. Primeiro são avaliadas as emissões veiculares de Itaipu, comparando-as com as emissões veiculares da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP); em segundo lugar, compara-se alguns parâmetros do ciclo de vida de Itaipu com valores similares da operação de usinas termelétricas, com valores obtidos de estudos brasileiros e de bases de dados internacionais; e em terceiro lugar faz-se uma breve e simplificada

aplicação dos valores das emissões de gases de efeito estufa deste ICV com um estudo nacional de ACV, com o intuito de mostrar que as contribuições do ciclo de vida da eletricidade a um estudo de ACV de produtos provavelmente será muito reduzida na maioria dos casos.

Ao final do Capítulo são feitos comentários sobre as limitações do estudo e seus resultados, com vistas a permitir recomendações à estudos futuros.

6.1 Sobre o significado da unidade funcional

Antes de mais nada, cabe lembrar que todos os dados do ICV, apresentado na Tabela 5.03, são dados em relação à unidade funcional deste estudo, definida no início do Capítulo 5, o mega- watt hora (MWh). Desta forma, uma primeira consideração merece ser feita sobre o que significa este montante de energia, buscando atribuir significados relacionados ao cotidiano desta grandeza. Para exemplificar, tem-se que com 1 MWh de eletricidade pode-se ter um dos seguintes usos finais de energia:

- iluminação ininterrupta por 16.667 horas, cerca de um ano e onze meses, por lâmpada incandescente de 60W;
- roupa lavada por 119 anos, considerando uma lavagem por semana, com ciclo de 30 min em uma máquina de 350 W de potência (10 kg de roupa seca);
- assistir 8.333 jogos de futebol, cada qual com dois tempos de 90 min. e um intervalo de 30 min, em um aparelho de televisão de 14", potência de 60W;
- ouvir 64.343 vezes a última sinfonia de Mozart, com 37 min e 20 s de duração, em um tocador de CD portátil de 25W;
- tomar um banho diariamente num chuveiro de 5.000 W, por 2 anos e 2 meses, sendo cada banho de 15 min. de duração, ou por 4 anos e 1 mês, sendo cada banho de 8 min. de duração³.

6.2 Agregação de dados semelhantes

Como pode se perceber nos Anexos D e E deste trabalho, a quantificação dos aspectos ambientais referentes aos ciclos de vida dos insumos não foi realizada em trabalho de campo, com o levantamento de dados primários, mas sim por meio de

³ Em geral as publicações de planejamento energético estimam os valores de tempo de banho ou em 15 min. ou em 8 min., por isso o uso dos dois valores.

pesquisa junto à literatura e a bases de dados próprias para ACV. Embora tenha-se tido o cuidado de buscar sempre informações o mais representativas dentro dos limites de possibilidade deste estudo, tem-se uma diversidade bastante razoável de fontes distintas de dados.

A principal conseqüência deste procedimento reside no fato de que, cada estudo utilizado como fonte de informação foi elaborado, à época de sua realização, com um propósito específico, que não a realização deste ICV. Desta forma, embora acredite-se que em cada caso tenha-se levantado e quantificado os aspectos mais significativos de cada processo, não há em muitos casos uma uniformidade de metodologia de amostragem, análise ou consolidação destes dados. Assim, por exemplo, no caso dos transportes a amostragem das emissões divide os poluentes orgânicos de modo distinto que no processo de coqueria. Desta forma, ao observar os inventários dos processos em separado, nota-se por exemplo que em alguns casos são amostrados os compostos orgânicos separados entre “hidrocarbonetos” e “aldeídos”, enquanto em outros consideram-se apenas os “COV- compostos orgânicos voláteis”, que podem ser tanto da família dos hidrocarbonetos como dos aldeídos. Este exemplo mostra a diversidade de critérios existentes num inventário originado a partir de dados de diversas fontes, o que pode ser notado em relação à vários aspectos ambientais deste ICV.

Assim sendo, antes de qualquer discussão sobre os dados do inventário, considerou-se necessário que se avaliasse a possibilidade de agregação de alguns aspectos semelhantes, facilitando assim este processo de análise.

A agregação dos aspectos tidos como semelhantes deve simultaneamente auxiliar a tarefa de discussão dos resultados e respeitar um nível de agregação tal que não prejudique o entendimento.

Tendo em vista este critério, decidiu-se agregar apenas alguns poucos aspectos, todos estes relacionados às emissões atmosféricas, a saber: óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, material particulado e compostos orgânicos. A primeira providência no sentido de realizar esta agregação foi identificar quais os parâmetros relativos a estes aspectos medidos em cada processos. A Tabela 6.01 apresenta o resultado desta pesquisa.

Tabela 6.01- Descrição dos parâmetros usados para caracterização de algumas emissões, por processo.

Processo	Material particulado						Compostos orgânicos				
	SO ₂	SO _x	NO ₂	NO _x	Part.	PM ₁₀	Outros	Hydrocarbonetos	Aldeídos	COV	Outros
Transporte terrestre	x			x		x				x	1,3 Butadieno, benzeno
Transporte marítimo	x			x			Fuligem	x			
Máquinas construção		x		x	x			x	x		
Queima combustíveis		x	x				Poeira, fuligem	x			
Extr. petróleo on shore	x			x			Poeira	x			HC Alifático, óleo cru.
Extr. petróleo off- shore		x		x			Poeira	x			
Refino petróleo		x		x			Poeira	x		x	Metil mercaptano
Fabricação cimento					x						
Produção clínquer					x						
Obtenção farinha					x						
Obtenção calcita							Poeira				
Obtenção gipsita						x					
Máquina mineração	x			x		x		x			
Sinterização	x			x	x						
Coqueificação	x			x			Fuligem	x			Benzeno, benzopireno, HC Aromático, Xileno, Tolueno.
Obtenção c. vegetal							Poeira			x	Eteno
Alto- fornos					x						
Forno elétrico				x	x						
Forno LD	x				x						
Forno SM	x			x	x						
Cobre	x			x							

Uma vez identificados estes parâmetros para cada processo, procedeu-se à agregação. Para tanto, recorreu-se ao auxílio de um especialista em química atmosférica, o químico Cláudio Alonso, da CETESB . Seguindo suas orientações, a agregação seguiu os seguintes critérios:

- óxidos de enxofre: segundo ALONSO (2003), a maior parte dos óxidos de enxofre presentes no parâmetro SO_x é composta de SO₂, sendo o SO₃ detectado muitas vezes apenas em traços. Desta forma, considerar que as emissões de SO₂ são na verdade emissões de SO_x não agrega erro considerável aos resultados;
- óxidos de nitrogênio: este caso, segundo ALONSO (2003) é distinto do caso dos óxidos de enxofre. O que sucede é que a combustão dos veículos diesel emite NO em predominância, mas este é rapidamente convertido por oxidação fotoquímica, em NO₂ (CETESB, 2002). Desta forma, entende-se que considerar as emissões de NO₂

como NO_x igualmente não agrega erro aos resultados. Além disso, é possível verificar pela Tabela 6.01 que apenas o processo de “queima de combustíveis” considera a emissão de NO₂ ao invés de NO_x;

c) material particulado: conforme ALONSO (2003), há diversas maneiras de se medir e caracterizar as emissões de material particulado. Estas variam tanto quanto ao diâmetro das partículas (caso dos parâmetros PM₁₀, PM_{2,5}, etc) como quanto ao tipo de partícula (poeira, fuligem, negro de fumo, etc). Como é possível notar, dentre os processos utilizados neste estudo há uma variedade bastante grande de nomenclaturas. Considerando que estas em sua maioria são traduções, sendo por exemplo os termos em inglês “carbon black” e “soot” ambos traduzidos como “fuligem”, poderia haver uma variedade ainda maior. De modo a simplificar esta estimativa, cabe dizer que o melhor modo de agregar estas emissões é somar seus valores todos sob o parâmetro de “material particulado”, uma vez que todos estes parâmetros representam alguma espécie de particulado. A preocupação recai então sobre o quanto estaríamos deixando de considerar no caso de processos que relatam a emissão de PM₁₀, uma vez que nestes casos não se consideram nas medições partículas maiores que 10 µm. Esta preocupação no entanto mostrou-se pouco relevante, uma vez que exceto no caso do processo de obtenção da gipsita, os demais processos que fornecem o particulado como PM₁₀ são processos de combustão diesel, e segundo ABRANTES (2002) a maior parte dos particulados emitidos pela queima de diesel possui diâmetro médio de 0,2 µm. Um gráfico apresentado pelo mesmo autor demonstra que na verdade mais de 98% das partículas neste caso possuem menos de 10 µm. Desta forma, decidiu-se agregar os particulados todos como “material particulado”, acreditando que o erro, se existente, é mínimo;

d) compostos orgânicos: Segundo WESTERHOLM (1991), *Apud* ABRANTES (2002), para os motores diesel já foram identificados mais de 445 substâncias orgânicas emitidas à atmosfera. Dentre as principais encontram-se os COV's, muitos dos quais hidrocarbonetos. De acordo com WHO (1996), *Apud* ABRANTES (2002), em termos de massa os hidrocarbonetos representam 0,0007% das emissões de um veículo diesel, e os aldeídos, 0,0014%. Esta constatação serve para exemplificar a importância de se separar estes dois parâmetros, sempre que possível. Há que se considerar inclusive a diferente toxicidade de cada composto orgânico, sendo

possível inclusive que dentro de uma mesma família, como os aldeídos, hajam compostos semelhantes e com grau de toxicidade distantes em duas ordens de grandeza (ALONSO, 2003). Desta forma, e considerando a dificuldade de obter dados mais precisos para as emissões estimadas, decidiu-se não realizar agregação sobre os aspectos que estimam as emissões de compostos orgânicos. As únicas exceções se devem às emissões de “hidrocarbonetos alifáticos” e “hidrocarbonetos aromáticos”, que serão adicionados à categoria “hidrocarbonetos”, e às emissões de “COV exceto metano”, que serão consideradas apenas como emissões de “COV”.

Além das emissões atmosféricas, uma outra classe de aspectos mereceu agregação, a geração de resíduos sólidos. Neste caso, temos aspectos semelhantes nos seguintes processos:

- petróleo off shore: “resíduo mineral” e “escória”;
- obtenção calcita: “resíduo sólido”;
- alto forno: “lodo”;
- aço laminado: “resíduo de aciaria”;
- cobre: “resíduos inorgânicos gerais”.

Neste caso, embora estes resíduos apresentem diferentes características, foram todos convertidos para um aspecto denominado “resíduo sólido”.

Além da agregação dos aspectos materiais, considerou-se importante realizar a agregação dos recursos energéticos, dados em alguns processos em unidades de massa, e em outros em unidades de energia. Decidiu-se converter todos estes para os valores em energia. Para tanto, utilizou-se o poder calorífico de cada recurso energético, estimado com os valores utilizados pela base de dados IDEMAT 2001, do SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003). Estes valores são:

- carvão: 7.300 kcal/ kg, ou 30,6 MJ/ kg;
- gás natural: 38,0 MJ/ kg;
- petróleo: 45,5 MJ/ kg;

Uma última consideração a ser feita é sobre dois aspectos da Tabela 5.03, o consumo de “basalto” e de “terra”, que ao contrário dos demais são apresentados em unidades de volume e não em massa. De modo a tornar uniforme a apresentação dos dados, levantou-se na literatura os valores das densidades destes materiais, para conversão dos valores volumétricos apresentados. Estas densidades são:

- rocha basáltica: 1.525 kg/m³ (MESCOLIN, 2002);
- terra: 1.150 kg/m³ (obtido da média aritmética dos valores apresentados para o latossolo roxo, segundo FERNANDES, LANÇAS, 2003);

Realizando estas alterações sobre os dados do ICV consolidado na Tabela 5.03, obtém-se os dados agregados, apresentados na Tabela 6.02 divididos entre as contribuições da etapa de construção e operação.

Tabela 6.02- ICV de Itaipu, com dados agregados.

	Unidade (/ MWh)	Total	CONSTRUÇÃO USINA	OPERAÇÃO USINA (100 anos)
Consumo de recursos materiais				
Água	kg	8,90E+00	7,16E+00	1,74E+00
Ar	kg	1,24E-05	7,86E-06	4,55E-06
Areia	kg	4,12E-01	4,12E-01	x
Argila	kg	8,34E-02	8,34E-02	4,15E-07
Basalto	kg	5,47E+00	5,47E+00	x
Bauxita	kg	4,00E-05	3,56E-05	4,36E-06
Calcita	kg	4,86E-01	4,70E-01	1,62E-02
Dolomita	kg	9,69E-04	6,14E-04	3,55E-04
Fluorita	kg	6,63E-04	4,20E-04	2,43E-04
Gipsita	kg	8,33E-03	8,33E-03	x
Madeira	kg	1,44E-01	9,13E-02	5,25E-02
Min. Cobre	kg	2,01E-03	5,47E-04	1,46E-03
Min. Ferro	kg	1,66E-01	1,05E-01	6,10E-02
Min. Manganês	kg	1,27E-03	8,04E-04	4,65E-04
Quartzita	kg	2,54E-03	1,61E-03	9,31E-04
Sal gema	kg	1,90E-05	1,69E-05	2,07E-06
Sucata aço	kg	6,53E-02	4,14E-02	2,39E-02
Sucata cobre	kg	2,93E-04	7,99E-05	2,13E-04
Terra	kg	3,05E+00	3,05E+00	x
Consumo de recursos energéticos				
Carvão	MJ	1,65335	1,038186	0,615164
Energia (inespec.)	MJ	4,33E-02	3,86E-02	4,73E-03
Energia do urânio	MJ	9,50E-04	8,46E-04	1,04E-04
Energia hidrelétrica	MJ	1,46E+00	1,36E+00	9,61E-02
Gás Natural	MJ	0,285592	0,23958	0,045512
Petróleo	MJ	5,4753	4,7862	0,69368
Emissões atmosféricas				
1,3 Butadieno	kg	1,40E-07	1,28E-07	1,17E-08
Aldeídos	kg	3,40E-05	3,40E-05	x
Amônia	kg	2,16E-07	1,36E-07	8,06E-08
Benzeno	kg	1,64E-05	1,60E-05	4,17E-07
Benzopireno	kg	2,42E-09	1,52E-09	9,00E-10
CaO	kg	1,21E-03	7,69E-04	4,45E-04
CH4	kg	1,32E-01	4,50E-04	1,32E-01

(continua)

Tabela 6.02- (continuação)

	Unidade (/ MWh)	Total	CONSTRUÇÃO USINA	OPERAÇÃO USINA (100 anos)
Chumbo	kg	1,65E-11	1,04E-11	6,10E-12
CO	kg	1,12E-01	7,12E-02	4,08E-02
CO2	kg	1,56E+00	4,45E-01	1,12E+00
COV	kg	3,74E-04	2,75E-04	9,87E-05
Etano	kg	3,70E-05	2,34E-05	1,36E-05
F2	kg	7,65E-08	4,80E-08	2,85E-08
FeO	kg	8,18E-04	5,18E-04	3,00E-04
Fluoretano	kg	2,42E-08	1,52E-08	9,00E-09
Fluoreto	kg	1,72E-06	1,10E-06	6,19E-07
H2	kg	1,83E-04	1,16E-04	6,70E-05
H2S	kg	1,10E-05	6,98E-06	4,07E-06
HCl	kg	4,97E-08	4,42E-08	5,42E-09
Hidrocarbonetos	kg	4,21E-04	3,74E-04	4,72E-05
Inespec.	Kg	1,03E-05	6,47E-06	3,84E-06
Material particulado	kg	2,49E-02	1,96E-02	5,32E-03
Mercúrio	kg	8,27E-15	5,22E-15	3,05E-15
Metais Pesados	kg	9,50E-08	8,46E-08	1,04E-08
Metil- mercaptano	kg	1,35E-09	1,20E-09	1,47E-10
N2O	kg	5,89E-07	5,77E-07	1,21E-08
NOx	kg	2,98E-03	2,71E-03	2,70E-04
Petróleo	kg	1,79E-05	1,60E-05	1,95E-06
SOx	kg	3,76E-03	2,10E-03	1,66E-03
Tolueno	kg	1,05E-07	6,57E-08	3,90E-08
Xileno	kg	1,13E-07	7,07E-08	4,20E-08
Efluentes líquidos				
Ác. Acético	kg	5,80E-03	3,68E-03	2,13E-03
Acetaldeído	kg	8,09E-05	5,12E-05	2,96E-05
Acetona	kg	1,50E-04	9,52E-05	5,51E-05
Ácido (H+)	kg	2,85E-06	2,54E-06	3,11E-07
Alcatrão	kg	1,39E-02	8,79E-03	5,08E-03
Amoníaco	kg	5,19E-08	3,29E-08	1,90E-08
Chumbo	kg	4,03E-09	2,53E-09	1,50E-09
Cianeto	kg	3,18E-07	2,02E-07	1,17E-07
Cl-	kg	3,75E-06	3,34E-06	4,09E-07
Cobre	kg	1,21E-09	7,58E-10	4,50E-10
Cromo 3+	kg	1,47E-09	9,32E-10	5,39E-10
DQO	kg	2,46E-07	2,19E-07	2,68E-08
Fenol	kg	5,37E-07	3,41E-07	1,95E-07
Ferro	kg	5,38E-06	3,41E-06	1,97E-06
Fluoreto	kg	2,23E-06	1,41E-06	8,16E-07
H2	kg	1,54E-07	1,37E-07	1,68E-08
Hexano	kg	5,36E-08	3,40E-08	1,97E-08
Hidrocarbonetos	kg	2,10E-06	1,82E-06	2,82E-07
Inorgânicos gerais	kg	6,36E-03	1,73E-03	4,63E-03
Íons metálicos	kg	5,00E-07	4,45E-07	5,45E-08
Manganês	kg	1,15E-07	7,28E-08	4,21E-08
Mercúrio	kg	2,42E-10	1,52E-10	9,00E-11
Metanol	kg	2,10E-03	1,33E-03	7,71E-04
Metil acetato	kg	1,85E-04	1,17E-04	6,78E-05

(continua)

Tabela 6.02- (continuação)

N total	kg	4,03E-08	2,53E-08	1,50E-08
NH3	kg	4,76E-06	3,02E-06	1,75E-06
Nitrato	kg	4,75E-06	3,01E-06	1,74E-06
Óleo	kg	1,34E-05	8,67E-06	4,69E-06
Orgânicos dissolvidos	kg	1,90E-06	1,69E-06	2,07E-07
PAH	kg	4,03E-10	2,53E-10	1,50E-10
Petróleo	kg	2,22E-06	1,98E-06	2,43E-07
Sódio	kg	1,88E-06	1,67E-06	2,05E-07
Sólidos dissolvidos	kg	6,30E-06	3,99E-06	2,31E-06
Sólidos suspensos	kg	1,92E-05	1,21E-05	7,03E-06
Substâncias dissolvidas	kg	9,50E-07	8,46E-07	1,04E-07
Substâncias suspensas	kg	6,65E-06	5,93E-06	7,26E-07
Sulfito	kg	3,56E-07	2,25E-07	1,30E-07
Zinco	kg	1,78E-05	1,13E-05	6,53E-06
Resíduos sólidos				
Resíduo sólido	kg	3,10E-01	8,75E-02	2,23E-01
Não materiais				
Perda calor (ar)	MJ	1,24E-02	9,44E-03	2,91E-03
Perda calor (água)	MJ	6,35E-02	4,85E-02	1,50E-02
Uso do solo	m2	1,52E-01	6,64E-04	1,52E-01

6.3 Análise de sensibilidade dos resultados para o horizonte de análise.

Como já exposto anteriormente em diversos pontos deste documento, a determinação da vida útil de uma hidrelétrica, e portanto a definição de um horizonte de análise para um estudo de ICV de hidrelétrica, é um ponto ainda bastante controverso. Internacionalmente diversos estudos (CARRINGTON, 2000; CURRAN, 2001; SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL 2002a; 2002b) utilizam o valor de 100 anos como período de análise. No entanto há outros que se utilizam de períodos distintos, como o valor de 60 anos (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 1999).

Desta forma, embora tenha-se decidido utilizar o valor de 100 anos por adequação às bases de dados internacionais, procedeu-se a uma análise de sensibilidade, de modo a verificar como os aspectos ambientais se comportam com a mudança deste parâmetro.

Antes de qualquer cálculo, deve-se ressaltar que, observando os resultados do ICV apresentados na Tabela 5.03, tem-se que para a grande maioria dos aspectos ambientais a contribuição na etapa de construção é muito superior a da etapa de operação da usina, o que leva à conclusão de que com o aumento do período de análise, e conseqüentemente da energia total gerada na vida da usina, os aspetos

relativos à construção serão diluídos na energia gerada, fazendo com que seus valores por unidade funcional (MWh) caiam conforme se aumenta o período de análise.

Para verificar esta hipótese no entanto, aplicou-se ao modelo desenvolvido no SimaPro, os períodos de análise de 60 e 200 anos de operação, além dos 100 anos definidos para este estudo. Os valores por unidade funcional (MWh) para estes três períodos de análise são apresentados na Tabela 6.03 a seguir, bem como os percentuais de variação do valor de cada aspecto para estes períodos em relação ao valor para os 100 anos.

Tabela 6.03- Comparação entre o resultado do ICV para diferentes períodos de análise.

	Unidade (/ MWh)	100 anos	60 anos	% variação 60-100 anos	200 anos	% variação 200- 100 anos
Consumo de recursos materiais						
Água	kg	8,90E+00	1,37E+01	53,93	5,65E+00	-36,52
Ar	kg	1,24E-05	1,66E-05	33,87	9,54E-06	-23,06
Areia	kg	4,12E-01	7,26E-01	76,21	1,98E-01	-51,94
Argila	kg	8,34E-02	1,47E-01	76,26	4,01E-02	-51,92
Basalto	kg	5,47E+00	9,64E+00	76,04	2,64E+00	-51,81
Bauxita	kg	4,00E-05	6,54E-05	63,50	2,27E-05	-43,25
Calcita	kg	4,86E-01	8,38E-01	72,43	2,47E-01	-49,18
Dolomita	kg	9,69E-04	1,30E-03	34,16	7,45E-04	-23,12
Fluorita	kg	6,63E-04	8,87E-04	33,79	5,09E-04	-23,23
Gipsita	kg	8,33E-03	1,47E-02	76,47	4,01E-03	-51,86
Madeira	kg	1,44E-01	1,93E-01	34,03	1,10E-01	-23,61
Min. Cobre	kg	2,01E-03	2,09E-03	3,98	1,95E-03	-2,99
Min. Ferro	kg	1,66E-01	2,23E-01	34,34	1,28E-01	-22,89
Min. Manganês	kg	1,27E-03	1,70E-03	33,86	9,76E-04	-23,15
Quartzita	kg	2,54E-03	3,40E-03	33,86	1,95E-03	-23,23
Sal gema	kg	1,90E-05	3,11E-05	63,68	1,08E-05	-43,16
Sucata aço	kg	6,53E-02	8,74E-02	33,84	5,02E-02	-23,12
Sucata cobre	kg	2,93E-04	3,06E-04	4,44	2,85E-04	-2,73
Terra	kg	3,05E+00	5,36E+00	75,85	1,46E+00	-52,08
Consumo de recursos energéticos						
Carvão	MJ	1,65E+00	2,21E+00	33,54	1,28E+00	-22,79
Energia (inespec.)	MJ	4,33E-02	7,08E-02	63,51	2,45E-02	-43,42
Energia do urânio	MJ	9,50E-04	1,55E-03	63,16	5,38E-04	-43,37
Energia hidrelétrica	MJ	1,46E+00	2,46E+00	68,49	7,76E-01	-46,85
Gás Natural	MJ	2,86E-01	4,53E-01	58,63	1,71E-01	-39,98
Petróleo	MJ	5,48E+00	8,84E+00	61,37	3,16E+00	-42,36
Emissões atmosféricas						
1,3 Butadieno	kg	1,40E-07	2,33E-07	66,43	7,65E-08	-45,36
Aldeídos	kg	3,40E-05	5,98E-05	75,88	1,63E-05	-52,06

(continua)

Tabela 6.03- (continuação)

	Unidade (/ MWh)	100 anos	60 anos	% variação 60-100 anos	200 anos	% variação 100-200 anos
Amônia	kg	2,16E-07	2,88E-07	33,33	1,67E-07	-22,69
Benzeno	kg	1,64E-05	2,85E-05	73,78	8,23E-06	-49,82
Benzopireno	kg	2,42E-09	3,22E-09	33,06	1,87E-09	-22,73
CaO	kg	1,21E-03	1,62E-03	33,88	9,33E-04	-22,89
CH4	kg	1,32E-01	1,40E-01	6,06	1,27E-01	-3,79
Chumbo	kg	1,65E-11	2,21E-11	33,94	1,27E-11	-23,03
CO	kg	1,12E-01	1,50E-01	33,93	8,59E-02	-23,30
CO2	kg	1,56E+00	1,95E+00	25,00	1,30E+00	-16,67
COV	kg	3,74E-04	5,45E-04	45,72	2,57E-04	-31,28
Etano	kg	3,70E-05	4,95E-05	33,78	2,84E-05	-23,24
F2	kg	7,65E-08	1,02E-07	33,33	5,91E-08	-22,75
FeO	kg	8,18E-04	1,10E-03	34,47	6,29E-04	-23,11
Fluoreteno	kg	2,42E-08	3,22E-08	33,06	1,87E-08	-22,73
Fluoreto	kg	1,72E-06	2,32E-06	34,88	1,31E-06	-23,84
H2	kg	1,83E-04	2,45E-04	33,88	1,41E-04	-22,95
H2S	kg	1,10E-05	1,48E-05	34,55	8,49E-06	-22,82
HCl	kg	4,97E-08	8,12E-08	63,38	2,81E-08	-43,46
Hidrocarbonetos	kg	4,21E-04	6,87E-04	63,18	2,39E-04	-43,23
Inespec.	kg	1,03E-05	1,37E-05	33,01	7,96E-06	-22,72
Material particulado	kg	2,49E-02	3,77E-02	51,41	1,62E-02	-34,94
Mercúrio	kg	8,27E-15	1,10E-14	33,01	6,36E-15	-23,10
Metais Pesados	kg	9,50E-08	1,55E-07	63,16	5,38E-08	-43,37
Metil- mercaptano	kg	1,35E-09	2,20E-09	62,96	7,63E-10	-43,48
N2O	kg	5,89E-07	1,02E-06	73,17	2,93E-07	-50,25
NOx	kg	2,98E-03	4,94E-03	65,77	1,64E-03	-44,97
Petróleo	kg	1,79E-05	2,93E-05	63,69	1,02E-05	-43,02
SOx	kg	3,76E-03	4,89E-03	30,05	2,99E-03	-20,48
Tolueno	kg	1,05E-07	1,40E-07	33,33	8,08E-08	-23,05
Xileno	kg	1,13E-07	1,50E-07	32,74	8,71E-08	-22,92
Efluentes líquidos						
Ác. Acético	kg	5,80E-03	7,77E-03	33,97	4,46E-03	-23,10
Acetaldeído	kg	8,09E-05	1,08E-04	33,50	6,22E-05	-23,11
Acetona	kg	1,50E-04	2,01E-04	34,00	1,16E-04	-22,67
Ácido (H+)	kg	2,85E-06	4,66E-06	63,51	1,61E-06	-43,51
Alcatrão	kg	1,39E-02	1,86E-02	33,81	1,07E-02	-23,02
Amoníaco	kg	5,19E-08	6,95E-08	33,91	3,99E-08	-23,12
Chumbo	kg	4,03E-09	5,37E-09	33,25	3,11E-09	-22,83
Cianeto	kg	3,18E-07	4,26E-07	33,96	2,45E-07	-22,96
Cl-	kg	3,75E-06	6,13E-06	63,47	2,13E-06	-43,20
Cobre	kg	1,21E-09	1,61E-09	33,06	9,33E-10	-22,89
Cromo 3+	kg	1,47E-09	1,97E-09	34,01	1,13E-09	-23,13
DQO	kg	2,46E-07	4,01E-07	63,01	1,39E-07	-43,50
Fenol	kg	5,37E-07	7,20E-07	34,08	4,12E-07	-23,28
Ferro	kg	5,38E-06	7,20E-06	33,83	4,13E-06	-23,23
Fluoreto	kg	2,23E-06	2,98E-06	33,63	1,71E-06	-23,32
H2	kg	1,54E-07	2,52E-07	63,64	8,72E-08	-43,38
Hexano	kg	5,36E-08	7,18E-08	33,96	4,12E-08	-23,13
Hidrocarbonetos	kg	2,10E-06	3,38E-06	60,95	1,23E-06	-41,43

(continua)

Tabela 6.03- (continuação)

	Unidade (/ MWh)	100 anos	60 anos	% variação 60-100 anos	200 anos	% variação 100-200 anos
Inorgânicos gerais	kg	6,36E-03	6,63E-03	4,25	6,18E-03	-2,83
Íons metálicos	kg	5,00E-07	8,17E-07	63,40	2,83E-07	-43,40
Manganês	kg	1,15E-07	1,54E-07	33,91	8,83E-08	-23,22
Mercurio	kg	2,42E-10	3,22E-10	33,06	1,87E-10	-22,73
Metanol	kg	2,10E-03	2,82E-03	34,29	1,62E-03	-22,86
Metil acetato	kg	1,85E-04	2,48E-04	34,05	1,42E-04	-23,24
N total	kg	4,03E-08	5,37E-08	33,25	3,11E-08	-22,83
NH3	kg	4,76E-06	6,37E-06	33,82	3,66E-06	-23,11
Nitrato	kg	4,75E-06	6,36E-06	33,89	3,65E-06	-23,16
Óleo	kg	1,34E-05	1,81E-05	35,07	1,01E-05	-24,63
Orgânicos dissolvidos	kg	1,90E-06	3,11E-06	63,68	1,08E-06	-43,16
PAH	kg	4,03E-10	5,37E-10	33,25	3,11E-10	-22,83
Petróleo	kg	2,22E-06	3,64E-06	63,96	1,26E-06	-43,24
Sódio	kg	1,88E-06	3,07E-06	63,30	1,06E-06	-43,62
Sólidos dissolvidos	kg	6,30E-06	8,43E-06	33,81	4,84E-06	-23,17
Sólidos suspensos	kg	1,92E-05	2,57E-05	33,85	1,47E-05	-23,44
Subst. dissolvidas	kg	9,50E-07	1,55E-06	63,16	5,38E-07	-43,37
Substâncias suspensas	kg	6,65E-06	1,09E-05	63,91	3,77E-06	-43,31
Sulfito	kg	3,56E-07	4,76E-07	33,71	2,74E-07	-23,03
Zinco	kg	1,78E-05	2,38E-05	33,71	1,37E-05	-23,03
Resíduos sólidos						
Resíduo sólido	kg	3,10E-01	3,26E-01	5,16	3,00E-01	-3,23
Não materiais						
Perda calor (ar)	MJ	1,24E-02	1,84E-02	48,39	8,23E-03	-33,63
Perda calor (água)	MJ	6,35E-02	9,46E-02	48,98	4,23E-02	-33,39
Uso do solo	m2	1,52E-01	2,68E-01	76,32	7,36E-02	-51,58

Como se pode notar na Tabela 6.03, há diversos níveis de variação percentual entre os valores dos três horizontes de análise. De modo a permitir uma melhor visualização de quais são as variações mais usuais, dividiu-se os dados da Tabela 6.03 em faixas de variação percentual, cada qual com cinco pontos percentuais.

Deste modo, contou-se quantos aspectos ambientais da Tabela 6.03 apresentam variação entre 0 e 5%, 5 e 10%, 10 e 15% e assim sucessivamente. Obteve-se assim uma contagem da “quantidade de valores” que ocorrem em cada faixa, para ambos os casos do horizonte de análise, de 60 anos em relação ao de 100 anos, e do horizonte de análise de 200 anos em relação ao de 100 anos.

O gráfico da Figura 6.01 apresenta estes valores.

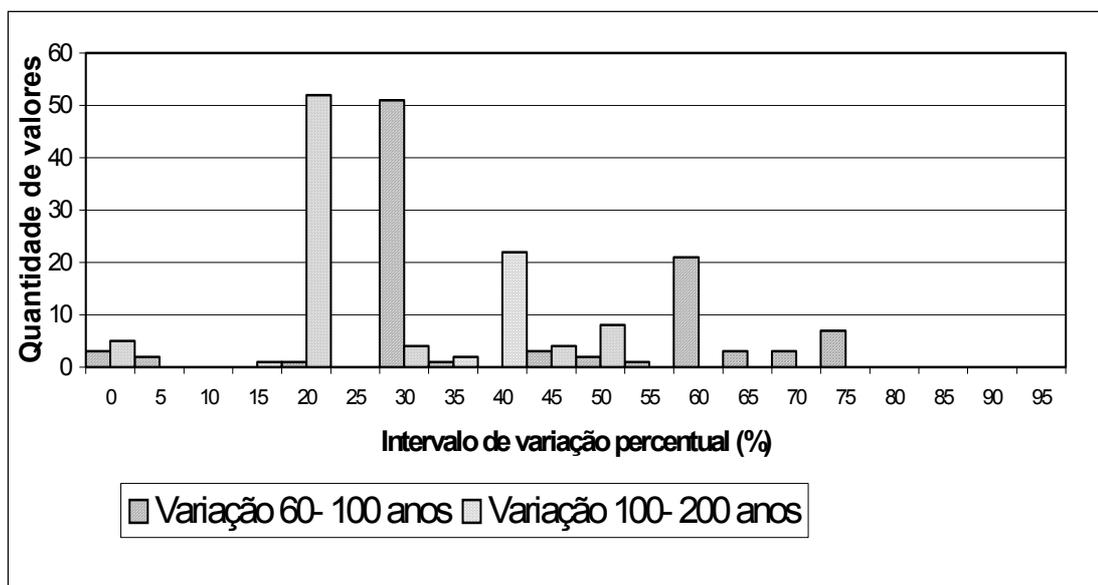


Figura 6.01- Distribuição da quantidade de valores da variação percentual dos aspectos ambientais para as diferenças entre os horizontes de análise avaliados.

Como pode ser perceber na Figura 6.01, há variações consideráveis da maior parte dos aspectos ambientais em questão, sendo que a maioria dos aspectos varia em torno de percentuais de 20%, 30%, e em seguida em torno de 40% e 65%.

Este fato demonstra que realmente há relevantes variações de diversos aspectos ambientais do ICV de Itaipu para os diferentes horizonte de análise, o que pode ser traduzido como uma forte dependência destes em relação à quantidade de energia gerada no ciclo de vida. Esta constatação afirma de modo inequívoco o fato de que grande parte das contribuições aos aspectos do ciclo de vida de Itaipu, e provavelmente das usinas hidrelétricas de modo geral, são oriundas da etapa de construção, e desta forma diluem-se ao longo da operação, sendo sensíveis portanto ao valor de energia gerada no período.

6.4 Comparação com estudos internacionais semelhantes

No Capítulo 3, de revisão bibliográfica, fez-se referência a estudos encontrados na literatura sobre levantamentos de dados de consumos e emissões de ciclos de vida de hidrelétricas. Embora nem todos sejam ICVs completos, os dados apresentados por estes estudos constituem-se referências internacionais de valores destes consumos e

emissões. Estes estudos, comentados e detalhados por RIBEIRO (2003), tem seus resultados resumidos nas Tabelas 3.04 e 3.05.

De modo a comparar os dados do ICV de Itaipu obtidos neste estudo com aqueles dos estudos internacionais, apresenta-se na Tabela 6.04 os valores referentes à Itaipu dos aspectos quantificados nos estudos internacionais, já apresentados na revisão bibliográfica. Decidiu-se nesta Tabela tomar, para cada conjunto de estudos realizados por uma mesma entidade, os valores máximo e mínimo de cada parâmetro. Desta forma, temos para cada rótulo da Tabela 6.04 as seguintes referências:

- Vattenfall 1996: BRÄNSTRÖM NORBERG et al. (1996);
- EPDs Vattenfall: SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL (1999; 2002a; 2002b);
- Lago Cheelan: CARRINGTON (2000);
- IEA: IEA (1998);
- Externe: EUROPEAN COMMISSION (1997b), NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS (1997), MARTINS et al. (1998);
- Gagnon et al.: GAGNON et al., 2002);

Tabela 6.04- Comparação de alguns aspectos ambientais do ciclo de vida de Itaipu com outros estudos semelhantes.

		ICV ITAIPU	Vattenfall 1996	EPDs Vattenfall		Lago Cheelan	IEA		ORNL		ExternE		GAGNON et al.	
				Max	Min		Máx	Min.	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min
Aço	kg/ MWh	0,142	0,08			-	0,0556		0,8660	0,3000	0,1221	0,0769		
Aço estrutural	kg/ MWh	0,054							0,1110	0,0276	0,0275			
Cimento	kg/ MWh	0,278	0,13			-	0,5556							
Concreto	m ³ / MWh	0,0014					0,0018	0,0017	0,0044	0,0022	0,0087	0,0064		
Cobre	kg/ MWh	0,0024	0,0025			-			0,0003	0,0001				
Min. Ferro	kg/ MWh	0,166	0,17	0,30	0,15	0,06								
Petróleo	kg/ MWh	0,120	-	0,23	0,07	0,11								
Areia	kg/ MWh	0,412	-	13,80	3,25	3,62					0,0808			
Calcáreo	kg/ MWh	0,486	-	0,56	0,44	1,12								
Rocha	kg/ MWh	5,47	-	53,50	35,90	-					0,0140			
Terra	kg/ MWh	3,05	-	30,70	20,80	0,12					0,1937			
Diesel	kg/ MWh	0,057					0,0833				0,0972			
Água	kg/ MWh	8,90	-	2,29	2,13	12,04								
NOx	kg/ MWh	0,0030	0,0059			0,0053	0,042	0,003	0,0448	0,0231	0,0061			
SO_x	kg/ MWh	0,0037	0,0015			0,0107	0,1	0,005	0,0161	0,0084	0,0006		0,007	0,001
CO	kg/ MWh	0,112	0,0046			0,0053					0,0020			
MP	kg/ MWh	0,0249	0,0007			0,0080	0,005		0,0031	0,0016	0,0004			
CO2	kg/ MWh	1,56	0,71			1,59	5,9	1,00	5,10	2,48	0,31		0,01	0,01
Emissão GEE	kg CO2 eq/ MWh	4,33	-	11,0	4,0	-		48,0	2,0			0,93	15,0	2,0
Uso solo	Km ² / MWh	1,52E-7	3,580E-07	1,08E-6	3,59E-7	-		15,2E-6	2E-6		3,55E-7		1,52E-4	1,00E-6
Pay-Back Energético	MWh gerado/ MWh investido	403,6	-			-		260	48				267	205

* Considerando para o metano um GWP (100 anos)= 21 kg CO₂ eq./ kg CH₄ (IPCC, 2003).

Uma primeira constatação que se pode obter observando a Tabela 6.04 é que os valores apresentados para o ICV de Itaipu encontram-se dentro da mesma ordem de grandeza de seus equivalentes encontrados na literatura, o que lhes garante certo grau de validação. Deve-se no entanto notar que estes valores da literatura, como já observado no Capítulo 3, apresentam uma grande variação entre si, devido principalmente a diferentes características das usinas, principalmente no que se refere ao tipo de suas barragens.

Observando individualmente os valores de cada um dos aspectos, pode-se notar que embora a obra de Itaipu tenha se distinguido por sua magnitude, que se expressa nos valores absolutos consumidos (alguns deles nunca antes vistos numa obra de engenharia), os valores específicos em relação à energia (valores por MWh gerado) muitas vezes, ou quase sempre, apresentam-se como menores que a média de outros estudos, o que denota um melhor desempenho ambiental.

Este desempenho parece estar relacionado com alguns fatores próprios da escolha do local da usina. Para tanto, há que se considerar que o Rio Paraná é um dos principais rios do mundo, sendo o mais importante rio da quarta maior Bacia Hidrográfica do planeta, tendo segundo a empresa (ITAIPU BINACIONAL, 1994) uma vazão média de 9.000 m³/s. Aliado a condições topográficas propícias e um regime pluvial privilegiado, a usina possui não apenas uma enorme potência instalada, até o momento a maior do mundo, mas também um dos maiores fatores de capacidade que se tem notícia, maior que 75%, como apresentado no Anexo D. Estes fatores fazem com que, utilizando a terminologia de engenharia econômica, haja uma “maximização” dos recursos utilizados, pela alta taxa de utilização da usina, ou em outros termos, ocorra uma “economia de escala” em relação tanto ao uso de recursos e insumos como na emissão de rejeitos.

Alguns aspectos no entanto merecem atenção especial, por possuírem valores bastante díspares, como por exemplo as emissões de monóxido de carbono e material particulado, além do uso do solo e do *pay-back* energético. Uma vez que não se conhecem as hipóteses dos demais estudos não é possível estabelecer justificativas a estas discrepâncias, mas podem-se tecer algumas hipóteses.

Sobre a emissão de monóxido de carbono, muito maior para Itaipu do que para as demais usinas, temos que aqui 99% das emissões de CO são provenientes do ciclo de

vida do aço, como será tratado mais adiante neste Capítulo, sendo que grande parte desta emissão provém dos alto-fornos e da obtenção do carvão vegetal.

Quanto ao material particulado, o ciclo de vida do aço é responsável por 58,3%, sendo novamente os alto-fornos as principais fontes de emissão. Além disso, 41,1% das emissões se devem ao ciclo de vida do cimento, sendo a obtenção da calcita a principal contribuinte.

Observando as hipóteses admitidas no Anexo E para o ciclo de vida do aço, pode-se compreender a razão desta disparidade. No caso dos alto-fornos, temos que tanto as emissões de particulado como de monóxido de carbono são bastante elevadas nas estimativas aqui conduzidas em função do reduzido grau de controle ambiental admitido para estes processos à época. Na verdade, como dito no Anexo E, esta estimativa foi realizada de modo “conservador”, considerando por ausência de dados uma emissão possivelmente maior que a existente à época. Esta premissa, como colocado no Anexo E, não foge muito da realidade do interior do Brasil na década de setenta, quando a indústria siderúrgica apresentava-se como uma fonte bastante relevante de emissões de monóxido de carbono e particulados, o que inclusive motivou ações dos órgãos ambientais à época, dentre elas a elaboração de grande parte do material utilizado como referência bibliográfica naquele Anexo.

Outra fonte relevante neste caso é o uso de carvão vegetal, que inexistia nos demais países, e seu processamento realmente se apresenta como uma fonte de CO devido à baixa tecnologia e qualidade dos fornos utilizados.

De fato são dois motivos distintos, mas que guardam entre si a semelhança de estarem relacionados à diferença tecnológica e de grau de controle ambiental do setor siderúrgico entre a época de construção da usina, considerado como ano base de 1977, e a época para a qual foram levantados os dados dos demais estudos, em geral a década de 90.

Além disso, quanto às emissões de material particulado, há que se considerar que realizou-se para o ICV de Itaipu uma agregação sobre estes dados. Neste procedimento, somou-se ao particulado fino (PM_{10}) a poeira, fuligem e demais particulados, sem distinção. Uma vez que se desconhece o procedimento adotado nos demais estudos, esta pode ser uma fonte de diferenciação dos resultados.

Sobre o *pay-back* energético, que apresenta um valor notoriamente inferior à média internacional, deve-se considerar a questão já apresentada da “economia de escala”, ou seja, a elevada taxa de geração de eletricidade, que dilui os consumos ao longo dos anos. Além disso, temos que cerca de 22% do consumo energético de todo o ciclo de vida de Itaipu se dá no ciclo de vida do cimento, como veremos no item a seguir, e que no Brasil à época já havia grande contribuição da via seca, de consumo energético quase que 50% menor que a via úmida, que é a rota preferencialmente utilizada na maioria dos outros países.

Sobre o uso do solo em Itaipu, temos que a usina neste quesito é realmente bastante eficiente, como é mostrado na Figura C.12, do Anexo C. A relação área/ potência de Itaipu encontra-se entre uma das melhores do mundo para as grandes usinas, fazendo praticamente desta uma usina “fio d’água”, não obstante seus 1.350 km² de reservatório.

Esta consideração leva a outra questão importante: a emissão de gases de efeito estufa, que na Tabela 6.04 apresenta-se como inferior a alguns resultados de países de clima temperado, o que parece ser uma incoerência. Na verdade não há incoerência alguma, pois para comparação das emissões entre diferentes latitudes deve-se comparar as emissões por área, e não por unidade de energia, principalmente considerando o fator anteriormente mencionado da notável relação área/ potência de Itaipu.

Sobre a emissão de gases de efeito estufa no entanto, é bastante complexo realizar inferências, até mesmo por conta das limitações das estimativas usadas neste trabalho. É possível inclusive que esta disparidade indique um equívoco nos valores aqui utilizados, mas esta hipótese somente poderá ser avaliada quando estimativas mais conclusivas sobre estes aspectos forem disponíveis para Itaipu.

6.5 Seleção de aspectos ambientais relevantes

Como já apontado no Capítulo 2, um dos objetivos deste trabalho é “identificar os aspectos ambientais mais significativos no ciclo de vida de uma usina hidrelétrica no Brasil”. Para tanto, após a quantificação dos aspectos ambientais no ICV foi feita uma análise, com objetivo de excluir aqueles não significativos, e para isso utilizou-

se dois critérios de corte apontados na norma internacional referente a este procedimento, a ISO 14.041 (ISO, 1998).

Antes de descrever os critério de corte, cabe uma nota referente à justificativa de utilizar linhas de corte, derivada da observação dos resultados obtidos na consolidação do ICV da usina, a partir dos ICVs dos insumos, no Capítulo 5.

Sucedede que existem alguns insumos, aos quais chamaremos de “básicos”, que alimentam diversos outros processos dos ciclos de vida dos insumos. É o caso, por exemplo, do óleo diesel, que é consumido inclusive em seu próprio ciclo de vida, no transporte do petróleo. Devido a esta característica, de participarem de diversos ciclos de vida, tem-se que os aspectos quantificados para os insumos básicos encontram-se presentes nos inventários de todos os outros processos que os consomem, propagando-se na proporção de suas contribuições.

Embora esta constatação pareça óbvia, como resultado temos muitas vezes valores muito reduzidos destes aspectos “propagados” nos inventários dos insumos efetivamente consumidos na construção da usina, ou seja, há uma série de aspectos no ICV consolidado que possuem relevância ambiental nos processos onde foram quantificados, extração de petróleo por exemplo, mas que para a usina pouco significam.

O intuito de selecionar aspectos busca eliminar o excesso de aspectos do inventário, retirando deste aqueles que pouco contribuem aos impactos ambientais do ciclo de vida. No entanto, como dito a princípio, o modo recomendado de realizar este processo de seleção é por meio da etapa de Avaliação de Impactos da metodologia de ACV, aplicando critérios de massa, energia e relevância ambiental.

Uma vez que este procedimento demanda extensas considerações, que desenvolvam e justifiquem seus critérios de avaliação, principalmente no que se refere ao estabelecimento dos fatores de equivalência, decidiu-se aplicar um juízo de valores mais simplificado, que permita a seleção de alguns aspectos relevantes mas que admite uma limitação de não haver esgotado as possibilidades de relevância ambiental.

Assim sendo, deve-se ter em mente que os aspectos ambientais aqui selecionados não são necessariamente os únicos, nem talvez os principais, em termos de relevância

ambiental. Estes são sim apenas aqueles que, numa primeira análise baseada na experiência internacional, apresentam-se como os mais significativos.

Desta forma, observou-se quais os aspectos usualmente tidos como relevantes nos diferentes estudos de hidrelétricas encontrados, já citados no item anterior deste Capítulo (BRÄNSTRÖM-NORBERG et al., 1996; CARRINGTON, 2000; EUROPEAN COMMISSION, 1995; 1998; GAGNON et al., 2002; IEA, 1998; 2000; ORNL, 1994; SWEDISH ENVIRONMENTAL MANEGEMENT COUNCIL, 1999; 2002a; 2002b; VATTENFALL, 1999).

Este exame demonstrou em primeiro lugar que em nenhum caso tem-se como significativos os impactos sobre a toxicidade, seja humana ou ambiental. A exceção são os estudos da Vattenfall AB para publicação de EPDs (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANEGEMENT COUNCIL, 1999; 2002a; 2002b), uma vez que esta consideração é uma exigência da metodologia de elaboração dos EPDs, ainda que seja para que se afirme sua pouca relevância. Cabe dizer que estes estudos apenas citam que os valores de toxicidade se encontram “em seu relatório principal” (*sic*), o que indica que estes não demonstram grande relevância ambiental no caso das hidrelétricas.

Soma-se a esta constatação a dificuldade de se estabelecer qualquer avaliação de toxicidade neste estudo, oriunda da já citada limitação de uniformidade entre as metodologias de coleta e análise dos aspectos encontradas entre os diferentes processos do ciclo de vida. Assim sendo, decidiu-se não incluir neste Capítulo qualquer consideração a este respeito.

Quanto ao esgotamento de recursos naturais, decidiu-se primeiramente trabalhar separando os recursos materiais dos energéticos. Para os recursos materiais, adotou-se um critério de massa, onde são considerados significativos aqueles consumos materiais que mais contribuem à massa total do ciclo de vida da usina. A Tabela 6.05 apresenta os percentuais de contribuição de cada consumo material.

Tabela 6.05- Contribuição dos consumos de recursos materiais ao ICV de Itaipu.

	Unidade (/ MWh)	Total	% Massa total
Consumo de recursos materiais			
Água	kg	8,90E+00	47,4
Basalto	kg	5,47E+00	29,1
Terra	kg	3,05E+00	16,2
Calcita	kg	4,86E-01	2,6
Areia	kg	4,12E-01	2,2
Min. Ferro	kg	1,66E-01	0,9
Madeira	kg	1,44E-01	0,8
Argila	kg	8,34E-02	0,4
Sucata aço	kg	6,53E-02	0,3
Gipsita	kg	8,33E-03	4,4E-02
Quartzita	kg	2,54E-03	1,4E-02
Min. Cobre	kg	2,01E-03	1,1E-02
Min. Manganês	kg	1,27E-03	6,8E-03
Dolomita	kg	9,69E-04	5,2E-03
Fluorita	kg	6,63E-04	3,5E-03
Sucata cobre	kg	2,93E-04	1,6E-03
Bauxita	kg	4,00E-05	2,1E-04
Sal gema	kg	1,90E-05	1,0E-04
Ar	kg	1,24E-05	6,6E-05
SOMA	kg	1,88E+01	100,0

Para os fins desta discussão de resultados, decidiu-se aplicar como valor de corte a contribuição de 1,0%, típica de estudos de ACV. No entanto foi feita uma exceção para o minério de ferro, cuja contribuição é de 0,9%. Desta forma, tem-se que os aspectos a serem considerados segundo este critério são o consumo de:

- água;
- basalto;
- terra;
- calcita;
- areia;
- minério de ferro;

Para os recursos energéticos, aplicou-se o critério de energia, semelhante ao de massa, também com critério de corte em 1,0% da energia total consumida, sendo os percentuais para cada energético apresentados na Tabela 6.06.

Tabela 6.06- Contribuição dos consumos de recursos energéticos ao ICV de Itaipu.

	Unidade (/ MWh)	Total	% energia total
Consumo de recursos energéticos			
Petróleo	MJ	5,4753	61,4
Carvão	MJ	1,65E+00	18,5
Energia hidrelétrica	MJ	1,46E+00	16,4
Gás Natural	MJ	2,86E-01	3,2
Energia (inespec.)	MJ	4,33E-02	0,5
Energia do urânio	MJ	9,50E-04	0,01
SOMA	MJ	8,92E+00	100,0

Desta forma, considerou-se significativo o consumo de petróleo, carvão, energia hidrelétrica e gás natural.

Em relação aos demais aspectos, decidiu-se incluir nos aspectos significativos apenas as emissões atmosféricas usualmente tidas como mais importantes em estudos de ACV e que no caso deste ICV totalizam 99,9% da massa total das emissões atmosféricas. A seguir apresentadas juntamente com sua contribuição percentual à massa total das emissões atmosféricas:

- CO₂ (84,8%);
- CH₄ (7,2%);
- CO (6,1%);
- material particulado (1,4%);
- SO_x (0,2%);
- NO_x (0,2%);

Além destes aspectos, em função do estimado no outros estudos já citados, decidiu-se considerar também como relevante o uso do solo.

A Tabela 6.07 apresenta os valores dos aspectos selecionados, extraídos da Tabela 6.02.

Tabela 6.07- Aspectos ambientais selecionados do ICV.

	Unidade (/ MWh)	Total	CONSTRUÇÃO	OPERAÇÃO (100 anos)
Consumo de recursos materiais				
Água	kg	8,90E+00	7,16E+00	1,74E+00
Areia	kg	4,12E-01	4,12E-01	x
Basalto	kg	5,47E+00	5,47E+00	x
Calcita	kg	4,86E-01	4,70E-01	1,62E-02

(continua)

Tabela 6.07- (continuação)

	Unidade (/ MWh)	Total	CONSTRUÇÃO	OPERAÇÃO (100 anos)
Min. Ferro	kg	1,66E-01	1,05E-01	6,10E-02
Terra	kg	3,05E+00	3,05E+00	x
Consumo de recursos energéticos				
Carvão	MJ	1,65335	1,038186	0,615164
Energia hidrelétrica	MJ	1,46E+00	1,36E+00	9,61E-02
Gás Natural	MJ	0,285592	0,23958	0,045512
Petróleo	MJ	5,4753	4,7862	0,69368
Emissões atmosféricas				
CH4	kg	1,32E-01	4,50E-04	1,32E-01
CO	kg	1,12E-01	7,12E-02	4,08E-02
CO2	kg	1,56E+00	4,45E-01	1,12E+00
Material particulado	kg	2,49E-02	1,96E-02	5,32E-03
NOx	kg	2,98E-03	2,71E-03	2,70E-04
SOx	kg	3,76E-03	2,10E-03	1,66E-03
Não materiais				
Uso do solo	m2	1,52E-01	6,64E-04	1,52E-01

6.6 Principais contribuições dos processos aos aspectos selecionados.

Além dos objetivos de “gerar e disponibilizar um inventário de ciclo de vida representativo da geração de eletricidade no Brasil” e de “identificar os aspectos ambientais mais significativos no ciclo de vida de uma usina hidrelétrica no Brasil”, este trabalho possui um outro objetivo, de “apontar quais os processos envolvidos no ciclo de vida de uma hidrelétrica que originam os aspectos ambientais mais significativos”, o que na terminologia de ACV são chamados de “hot spots”.

Tradicionalmente em ACV, para que se realize esta identificação parte-se dos aspectos identificados como mais significativos, obtida na etapa de Avaliação de Impactos. Uma vez que esta etapa não foi conduzida neste estudo, decidiu-se trabalhar com os aspectos selecionados anteriormente, na Tabela 6.05.

Há que se considerar no entanto que diversos aspectos destes, consumos materiais na verdade, são exclusividade das obras de construção da usina. Esta afirmação vale para o consumo de areia, basalto e terra.

Além disso, temos que o minério de ferro é consumido exclusivamente no ciclo de vida do aço, e a calcita predominantemente no ciclo de vida do cimento. A consideração de consumo destes insumos, assim como é o caso do diesel no caso do petróleo, mostra-se muito mais útil do que a consideração exclusiva das matérias-primas minerais em questão.

Sendo assim, decidiu-se trabalhar não com a relação de aspectos tal como apresentado na Tabela 6.05, mas sim com os seguintes aspectos ambientais:

- consumo de aço;
- consumo de cobre;
- consumo de diesel;
- consumo de água;
- emissão de CO₂;
- emissão de CH₄;
- emissão de CO;
- emissão de material particulado;
- emissão de SO_x;
- emissão de NO_x;
- uso do solo;
- *pay-back* energético;

De modo a não sobrecarregar o texto, não serão apresentados os cálculos realizados para estimativa destas contribuições. Estes foram realizados automaticamente, tomando a base criada no SimaPro, com informações adicionais obtidas nas descrições dos processos, contanto dos Anexo D e E. No entanto, com um pouco mais de trabalho do que usando o programa, estes resultados todos podem ser obtidos usando as informações fornecidas pelas consolidações dos ICVs dos insumos, apresentadas nos Capítulos 5 e 6 deste texto.

A respeito dos efluentes líquidos, resíduos sólidos e perda de calor, cabe dizer que a quase totalidade destes aspectos advém do ciclo de vida do cobre, ciclo de vida do aço (principalmente etapa de coqueria) e refino e extração do petróleo. As estimativas destes processos em sua maioria são originárias de bases de dados de ACV adaptadas para este estudo, que em diversos momentos consideram o ciclo de vida por detrás destes processos. Desta forma, é possível que grande parte destes não se apresente, principalmente após a consolidação do ICV de Itaipu, em quantidades significativas. Esta afirmação no entanto é apenas uma hipótese, e sua confirmação só será possível mediante uma avaliação de impactos que demonstre criteriosamente sua veracidade. De momento, considerando a ausência de um critério científico e

confiável de comparação, decidiu-se por não incluir estes aspectos nas considerações deste Capítulo.

Apenas uma observação interessante sobre os efluentes líquidos é que dos trinta e quatro aspectos, temos apenas quatro em quantidade significativa, sendo que a soma de suas massas equivale a 98,28% de todas as emissões de efluentes líquidos. Estes são o ácido acético, alcatrão, inorgânicos gerais e metanol. Destes, apenas os inorgânicos gerais, proveniente exclusivamente do ciclo de vida do cobre, não são oriundos da obtenção de carvão vegetal, o que leva à conclusão de que este processo especificamente parece ser de grande relevância ambiental no ciclo de vida do aço.

Sobre a atribuição dos aspectos selecionados aos processos do ciclo de vida de Itaipu, cabe salientar que a divisão de processos adotada nesta análise é a mesma adotada no Capítulo 5, para os dados relativos aos processos do ciclo de vida de Itaipu, a saber:

- operação das máquinas de construção;
- ciclos de vida do aço, cimento e cobre;
- transportes de cimento, cinzas, diesel e operários;
- produção do concreto (construção e operação do canteiro, e consumo insumos para concreto);
- equipamentos permanentes;
- formação do reservatório (uso do solo e emissão de gases efeito estufa);

A seguir cada um dos consumos e emissões selecionados é sinteticamente avaliado, e em seguida a Figura 6.03 apresenta as contribuições de forma gráfica.

a) Consumo de aço:

Em todo o ciclo de vida de Itaipu, para 100 anos de análise, são consumidos $1,26 \cdot 10^9$ kg de aço, sendo $7,97 \cdot 10^8$ kg (63,3%) na construção da usina, e $4,61 \cdot 10^8$ kg (36,7%) na sua operação.

Identificando o destino deste aço entre os processos, percentualmente temos:

- equipamentos permanentes: 59,0 % (36,7% na operação e 22,3% na construção);
- aço estrutural para o concreto: 38,0%;
- aço nos equipamentos do canteiro: 3,0%

De modo a facilitar a consolidação dos dados, os consumos e emissões a seguir não consideram a divisão do consumo de aço entre “equipamentos permanentes”, “aço estrutural” e “aço para canteiro”. Desta forma, serão avaliadas as contribuições ao “ciclo de vida do aço”, e havendo interesse em saber a contribuição a cada um destes em separado, basta ponderar o total do aço pela percentagem de consumo de cada um destes três consumos do insumo.

b) Consumo de cobre:

Para os 100 anos do período de análise, são consumidos $2,01 \cdot 10^7$ kg de cobre, sendo todo este consumo nos geradores (76,3% do cobre) e transformadores (23,7% do cobre). Deste total, $5,48 \cdot 10^6$ kg (27,2%) são consumidos na construção e $1,46 \cdot 10^7$ kg (72,8%) na operação durante os 100 anos.

c) Consumo de diesel:

Considerando todo o ciclo de vida de Itaipu estimado neste estudo, há um consumo de $5,12 \cdot 10^8$ kg de óleo diesel, sendo $4,8 \cdot 10^8$ kg (93,8%) na construção e $3,2 \cdot 10^7$ kg (6,2%) na operação da usina. Este consumo está distribuído entre as operações de transporte, operação de máquinas e geração de calor, em usinas termelétricas e processos diversos.

Percentualmente podemos atribuir este consumo com sendo distribuído como segue:

- operação das máquinas de construção: 67,1%;
- ciclo de vida do aço: 16,8%;
- ciclo de vida do cimento: 10,6%;
- transporte do cimento: 3,2%;
- transporte de operários: 0,8%;
- transporte do aço estrutural: 0,7%;
- transporte cinzas: 0,5%;
- outros: 0,3%;

Estes percentuais no entanto trazem uma particularidade: quando se considera o consumo de diesel de um processo, na verdade se considera o consumo de todo o ciclo de vida deste processo em relação ao diesel. Isso significa que, por exemplo, ao se calcular o consumo de diesel para a operação das máquinas de construção, na

verdade se calcula o quanto estas máquinas efetivamente consumiram de diesel (apenas 295.000 t de diesel, o que equivale a 57,7% do total), mais o quanto se gastou de diesel no transporte deste diesel para a obra, mais o quanto se consumiu de diesel para que se obtivesse esta quantidade de diesel, com o transporte do petróleo por exemplo. Embora num estudo de ACV este conceito pareça ser evidente, é necessário que se ressalte aqui este detalhe dos cálculos, uma vez que se este for relevado podem haver interpretações equivocadas dos resultados aqui apresentados. De modo a evitar estes equívocos, julgou-se de interesse a avaliação do consumo de diesel por processo unitário, ao longo de todo o ciclo de vida, resultando nos seguintes valores percentuais do total de diesel consumido:

- operação das máquinas de construção: 57,7%;
- transporte do petróleo desde o Oriente Médio: 26,4%;
- transporte navio- granel (carvão importado): 6,2%;
- transportes de caminhão (todos): 5,1%;
- queima de óleos (geração termelétrica e obtenção de calcita: 1,9%;
- queima de diesel (geração termelétrica): 1,3%;
- transporte ônibus: 0,7%;
- máquinas mineração: 0,7%

Uma vez que um dos principais consumos de diesel aparece como sendo o transporte em caminhão, cabe detalhar como este transporte se distribui entre as diversas etapas do ciclo de vida. Tendo um total de $4,8 \cdot 10^9$ t.km de transportes de caminhão por todo o ciclo de vida de Itaipu, pode-se resumir as contribuições como sendo:

- transporte de cimento: $2,59 \cdot 10^9$ t.km (53,9%);
- transporte de aço estrutural: $6,11 \cdot 10^8$ t.km (12,7%);
- transportes do ciclo de vida do cimento: $6,07 \cdot 10^8$ t.km (12,6%), sendo:
 - transporte de calcita: 7,2% do total de transportes de caminhão;
 - transporte de gipsita: 4,6% do total de transportes de caminhão;
 - transporte de argila: 0,8% do total de transportes de caminhão;
- transporte de cinzas: $3,9 \cdot 10^8$ t.km (8,1%);
- transporte de diesel: $3,06 \cdot 10^8$ t.km (6,4%);
- transportes do ciclo de vida do aço: $2,93 \cdot 10^8$ t.km (6,1%), sendo:
 - transporte do carvão vegetal: 3,9 % do total de transportes de caminhão;

d) Consumo de água:

De acordo com as estimativas deste trabalho, no ciclo de vida de Itaipu são consumidos $7,94 \cdot 10^{10}$ kg de água, sendo $6,39 \cdot 10^{10}$ kg (80,5%) na construção, e $1,55 \cdot 10^{10}$ kg (19,5%) na operação durante os 100 anos do período de análise.

Percentualmente, temos a seguinte distribuição deste consumo:

- ciclo de vida do aço: 53,2%, sendo:
 - alto-forno a coque: 42,8% do consumo total de água do ciclo de vida;
- ciclo de vida do cimento: 43,0%;
- obtenção do concreto: 2,7%;
- outros: 1,1%.

Neste caso, observa-se que o consumo de água é dominado pelo uso de água no alto-forno a coque, que consome 60 m^3 de água por tonelada de gusa produzido, segundo MEYERS; JENNINGS (1979). É interessante notar que este consumo específico é cinco vezes maior que o consumo específico de um alto-forno a carvão vegetal, que utiliza 12 m^3 segundo a mesma referência.

Deve-se ressaltar que em diversos destes processos o uso de água não significa realmente um consumo, sendo este uso em alguns casos não consuntivos, ou seja, a água não é indisponibilizada, apenas tem alteradas suas características físico-químicas, como nos processos de resfriamento, por exemplo.

e) Emissão de CO₂:

Em todo o ciclo de vida da usina de Itaipu, é estimada a emissão de $1,39 \cdot 10^{10}$ kg de CO₂, sendo $3,97 \cdot 10^9$ kg (28,5%) emitidos na construção e $9,97 \cdot 10^9$ kg (71,5%) emitidos na operação pelos 100 anos.

Como pode ser notado nos percentuais apresentados a seguir, o predomínio destas emissões é do processo de formação do reservatório:

- formação do reservatório (emissão gases de efeito estufa): 69,2%;
- ciclo de vida do cimento: 16,7%;
- operação das máquinas de construção: 8,1%;
- ciclo de vida do aço: 4,2%;
- ciclo de vida do cobre: 1,1%;

- transporte do cimento: 0,4%;
- transporte de ônibus: 0,1%;
- transporte de aço estrutural: 0,1%;
- outros: 0,1%

f) Emissão de CH₄:

As emissões de metano, assim como as de dióxido de carbono, são predominantes no processo de formação do reservatório. De um total de $1,18 \cdot 10^9$ kg de emissão de metano, sendo apenas $4,0 \cdot 10^6$ kg (0,3%) na etapa de construção, a formação do reservatório contribui com $1,17 \cdot 10^9$ kg, o que significa uma contribuição de 99,5%. Os demais 0,5% são praticamente todos provenientes do ciclo de vida do aço.

Deve-se no entanto ter em mente a limitação de que provavelmente há emissões de metano que, devido aos diferentes métodos de contabilização dos aspectos ambientais, não são explícitos. Desta forma, é possível que hajam emissões de metano quantificadas como “VOC” ou “Hidrocarbonetos” em alguns processos. Esta limitação no entanto não parece ser significativa, uma vez que comparando as quantidades de todas as emissões atmosféricas de compostos orgânicos do ICV, as emissões de metano equivalem a 99,90% do total em massa.

g) Emissão de CO:

Segundo as estimativas deste trabalho, no ciclo de vida de Itaipu são emitidos $9,98 \cdot 10^8$ kg de monóxido de carbono (CO), sendo $6,35 \cdot 10^8$ kg (63,6%) na construção da usina e $3,64 \cdot 10^8$ (36,4%) na sua operação por 100 anos.

A contribuição percentual por processo neste caso é apresentada a seguir:

- ciclo de vida do aço: 99,4%, sendo:
 - obtenção gusa em alto- forno a coque: 49,6%;
 - obtenção gusa em alto- forno a carvão vegetal: 33,1%;
 - obtenção do carvão vegetal: 8,8%;
 - forno LD (apenas o processo): 6,0%;
 - sinterização: 1,5%;
- operação das máquinas de construção: 0,5%;
- outros: 0,1%;

h) Emissão de material particulado:

Tendo em vista a simplificação realizada no início deste capítulo, onde diversos parâmetros de emissões foram agrupados como “emissão de particulado”, temos que no ciclo de vida de Itaipu foi estimada a emissão de $2,22.10^8$ kg de material particulado, sendo $1,75.10^8$ kg (78,6%) na construção e $4,47.10^7$ kg (21,4%) na operação pelos 100 anos.

Quanto à distribuição destas emissões por processo tem-se:

- ciclo de vida do aço: 58,3%, sendo:
 - obtenção de gusa em alto- forno a coque: 21,0%;
 - obtenção de gusa em alto- forno a carvão vegetal: 14,0%;
 - obtenção do sinter: 9,67%;
 - aciaria LD: 6,64%;
 - aciaria elétrica: 2,83%;
 - aciaria SM: 0,1%;
- ciclo de vida do cimento: 41,1%, sendo:
 - obtenção da calcita: 39,0%;
- operação das máquinas de construção: 0,4%
- outros: 0,2%;

i) Emissão de SO_x:

Quanto às emissões de óxidos de enxofre, cabe dizer que neste estudo foram estimadas, considerando a agregação realizada, a emissão de $3,35.10^7$ kg de SO_x, sendo $1,87.10^7$ kg (55,9%) na construção e $1,48.10^7$ kg (44,1%) na operação.

Percentualmente, entre os processos temos as seguintes contribuições:

- ciclo de vida do cobre: 40,4%;
- ciclo de vida do aço: 40,2%, sendo:
 - forno SM (só processo): 23,8%;
- operação das máquinas de construção: 11,2%;
- ciclo de vida do cimento: 7,5%;
- outros: 0,7%.

Observando os valores acima é notável a expressiva contribuição do ciclo de vida do cobre. Na verdade, tendo em conta as considerações do IDEMAT 2001 (PRE

CONSULTANTS, 2003), base de onde este processo foi extraído, esta se deve ao minério de cobre utilizado para extração do metal. De acordo com a referência, este minério é um sulfato, com 0,6% de cobre, e que forma no processo de beneficiamento 2,120 kg de SO_x/ kg cobre, o qual é submetido a um tratamento com eficiência de remoção de 31,6%, de modo a atender a legislação ambiental.

j) Emissão de NO_x:

As emissões de óxidos de nitrogênio, segundo as estimativas realizadas, são de 2,66.10⁷ kg para todo o ciclo de vida de Itaipu, sendo 2,42.10⁷ kg (90,9%) na construção e 2,41.10⁶ kg (9,1%) na operação.

Percentualmente, temos as seguintes contribuições:

- operação das máquinas de construção: 59,9%;
- ciclo de vida do aço: 21,4%;
- ciclo de vida do cimento: 12,4%;
- transporte do cimento: 2,8%;
- ciclo de vida do cobre: 1,7%;
- transporte de operários: 0,6%;
- transporte de aço: 0,6%;
- outros: 0,6%.

k) Uso do solo:

A estimativa de uso do solo no ciclo de vida de Itaipu é bastante limitada, e não segue um padrão para sua contabilização. Tem-se este aspecto quantificado apenas para a extração do cobre, plantio de árvores para obtenção do carvão vegetal, extração de petróleo *off shore* e na formação do reservatório da usina.

Considerando estes processos, estimou-se para o ciclo de vida de Itaipu um uso de solo total de 1,36.10⁹ m², sendo que 99,3% deste valor é devido a formação do reservatório, que ocupa 1.350 km².

Se compararmos os demais processos para os quais se contabilizou este parâmetro, temos as seguintes contribuições, com o percentual relativo ao valor do uso do solo para o reservatório entre parênteses:

- plantio de árvores para obtenção do carvão vegetal: 9,2 km² (0,676%);

- extração de cobre: 0,35 km² (0,025%);
- extração petróleo *off-shore*: 9,1.10⁻⁴ km² (0,000067%);

Estes percentuais indicam a possibilidade de que a contabilização de outros possíveis usos do solo (mineração do carvão e do ferro, por exemplo), não contabilizado neste estudo, também não devam apresentar grande significado no total do ciclo de vida, evidenciando que a grande contribuição ao uso do solo é realmente a formação do reservatório.

1) Pay-back energético:

O *pay-back* energético representa a quantidade de energia gerada a partir de cada unidade de energia investida no ciclo de vida, e para sua contabilização somam-se todas as entradas de recursos energético do ciclo de vida (cabe dizer que neste tipo de cálculo considera-se o conteúdo energético de cada recurso mesmo sendo este utilizado como matéria-prima e não como fonte energética do processo).

Tem-se que no ciclo de vida de Itaipu foram consumidos 7,93.10¹⁰ MJ de recursos energéticos (22,05.10⁶ MWh), o que considerando os 8,9.10⁹ MWh gerados ao longo dos 100 anos resulta num *pay-back* energético de 403,6.

Devido à importância deste aspecto, decidiu-se realizar um maior detalhamento das contribuições a cada insumo energético por processo. Na Tabela 6.08 a seguir apresenta-se o consumo de energéticos por processo do ciclo de vida.

De modo a uniformizar os dados, converte-se nesta Tabela todos os consumos de energéticos quantificados para o ciclo de vida para valores em MJ. Como alguns são dados em massa (kg), criou-se em alguns casos as linhas “valor dado em massa”, que são transformados em energia com a multiplicação pelo poder calorífico dado nos Anexos (carvão: 30,6 MJ/ kg; petróleo: 45,5 MJ/ kg; gás natural: 38,0 MJ/ kg). Estes valores, expressos nas linhas “conversão em energia”, são somados pelos valores já quantificados em unidades de energia (nas linhas “valor dado em energia”), originando o valor total.

Além destas conversões para cada energético em cada processo, a Tabela 6.08 apresenta os valores absolutos e percentuais totais de energia consumida.

Tabela 6.08- Recursos energético consumidos no ciclo de vida de Itaipu.

		Un.	Total	CV aço	CV cimento	CV cobre	Op. Máq. Constr.	Transp. Cimento	Transp. Aço	Transp. Cinza	Transp. Ônibus	Óleo lubrif.	Op. Canteiro	Op. Usina	Outros
Petróleo	Valor dado em massa	kg	1,06E+09	3,04E+08	3,37E+08	3,22E+07	3,52E+08	1,68E+07	3,97E+06	2,53E+06	4,27E+06	5,09E+06	0,00E+00	0,00E+00	2,14E+06
	Conversão energia	MJ	4,82E+10	1,38E+10	1,53E+10	1,47E+09	1,60E+10	7,64E+08	1,81E+08	1,15E+08	1,94E+08	2,32E+08	0,00E+00	0,00E+00	9,74E+07
	Valor dado em energia	MJ	5,42E+08	1,61E+08	1,78E+08	3,36E+05	1,86E+08	8,88E+06	2,09E+06	1,34E+06	2,26E+06	2,69E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Total	MJ	4,88E+10	1,40E+10	1,55E+10	1,47E+09	1,62E+10	7,73E+08	1,83E+08	1,16E+08	1,97E+08	2,34E+08	0,00E+00	0,00E+00	9,74E+07
	%	%	100,00	28,69	31,80	3,00	33,22	1,59	0,37	0,24	0,40	0,48	0,00	0,00	0,20
Hidr	Valor dado em energia	MJ	1,29E+10	2,20E+09	1,22E+09	6,68E+07	2,91E+06	1,39E+05	3,27E+04	2,09E+04	3,53E+04	4,20E+04	9,50E+09	1,70E+06	0,00E+00
	%	%	100,000	17,054	9,457	0,518	0,023	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	73,643	0,013	0,00E+00
Carvão	Valor dado em massa	kg	4,81E+08	4,72E+08	1,01E+06	7,97E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+04
	Conversão energia	MJ	1,47E+10	1,44E+10	3,09E+07	2,44E+08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,12E+05
	Valor dado em energia	MJ	8,47E+06	2,51E+06	2,78E+06	5,25E+03	2,91E+06	1,39E+05	3,27E+04	2,09E+04	3,53E+04	4,20E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Total	MJ	1,47E+10	1,44E+10	3,37E+07	2,44E+08	2,91E+06	1,39E+05	3,27E+04	2,09E+04	3,53E+04	4,20E+04	0,00E+00	0,00E+00	6,12E+05
	%	%	100,000	98,090	0,229	1,656	0,020	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004
Gás Natural	Valor dado em massa	kg	7,88E+06	7,22E+05	7,98E+05	5,45E+06	8,36E+05	8,66E+05	9,41E+03	6,01E+03	1,01E+04	1,21E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Conversão energia	MJ	2,99E+08	2,74E+07	3,03E+07	2,07E+08	3,18E+07	3,29E+07	3,58E+05	2,28E+05	3,84E+05	4,60E+05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Valor dado em energia	MJ	2,24E+09	6,66E+08	7,36E+08	1,39E+06	7,70E+08	3,68E+07	8,67E+06	5,54E+06	9,35E+06	1,11E+07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Total	MJ	2,54E+09	6,93E+08	7,66E+08	2,08E+08	8,02E+08	6,97E+07	9,03E+06	5,77E+06	9,73E+06	1,16E+07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	%	%	100,000	27,307	30,177	8,210	31,573	2,745	0,355	0,227	0,383	0,455	0,000	0,000	0,000
Inesp	Valor dado em energia	MJ	3,86E+08	1,15E+08	1,27E+08	2,39E+05	2,59E+05	6,33E+06	1,49E+06	9,53E+05	1,61E+06	1,91E+06	0,00E+00	0,00E+00	1,31E+08
	%	%	100,000	29,793	32,902	0,062	0,067	1,640	0,386	0,247	0,417	0,495	0,000	0,000	3,40E+01
Urânio	Valor dado em energia	MJ	8,47E+06	2,51E+06	2,78E+06	5,25E+03	2,91E+06	1,39E+05	3,27E+04	2,09E+04	3,53E+04	4,20E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	%	%	100,000	29,634	32,822	0,062	34,357	1,641	0,386	0,247	0,417	0,496	0,000	0,000	0,000
TOTAL		MJ	7,93E+10	3,14E+10	1,77E+10	1,98E+09	1,70E+10	8,50E+08	1,93E+08	1,23E+08	2,08E+08	2,48E+08	9,50E+09	1,70E+06	2,29E+08
		%	100,0	39,6	22,3	2,5	21,4	1,1	0,2	0,2	0,3	0,3	12,0	0,0	0,3

Os dados da Tabela 6.08 podem ser melhor visualizados com auxílio de gráficos de barras. Desta forma, primeiramente se apresentam na Figura 6.02 os percentuais de consumo de cada energético em cada processo.

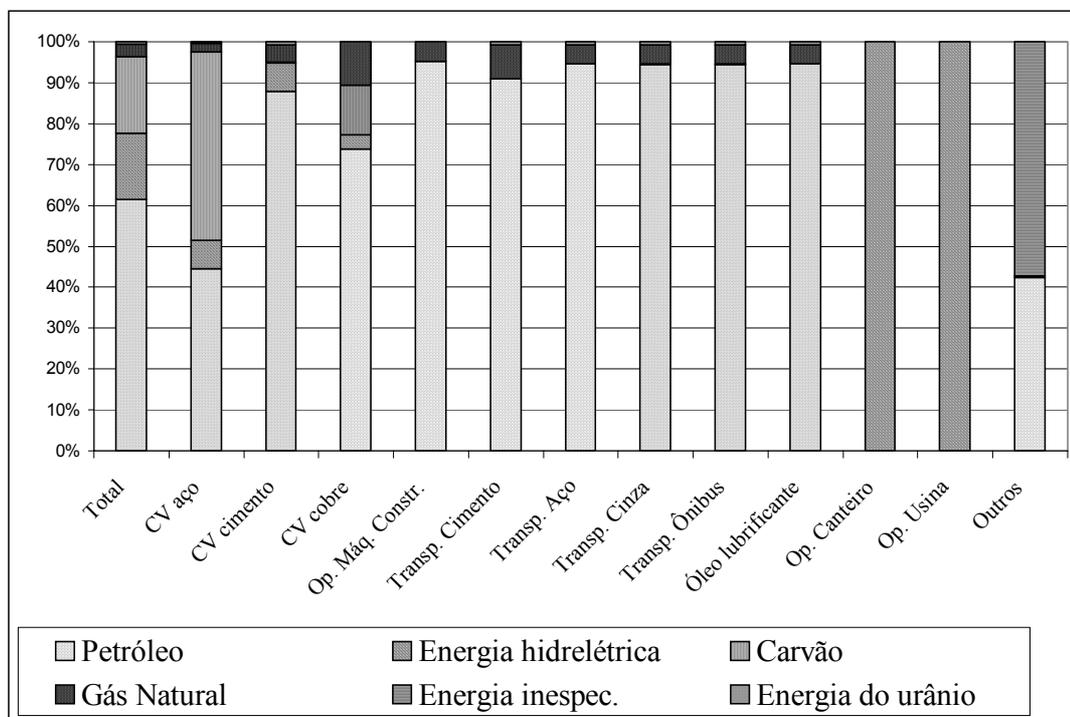


Figura 6.02- Contribuição percentual de cada recurso energético em cada processo.

O gráfico da Figura 6.02 permite notar a predominância do petróleo como recurso energético, que na verdade é consumido na forma de óleo diesel pelas etapas de transporte. No caso do ciclo de vida do aço apenas é que há uma forte participação do carvão, uma vez que grande parte do processo siderúrgico usa como insumo energético o carvão utilizado para reduzir o ferro.

A exceção a esta regra são as etapas de operação do canteiro e da usina, que consomem exclusivamente eletricidade, que no caso de Itaipu era obtida não da matriz elétrica nacional, mas de hidrelétricas unicamente (do sistema Paraguaio na construção da usina e posteriormente na própria Itaipu).

De modo a permitir uma outra abordagem à discussão dos resultados de consumo energético, a Figura 6.03 apresenta os percentuais de contribuição de cada processo no consumo de cada energético.

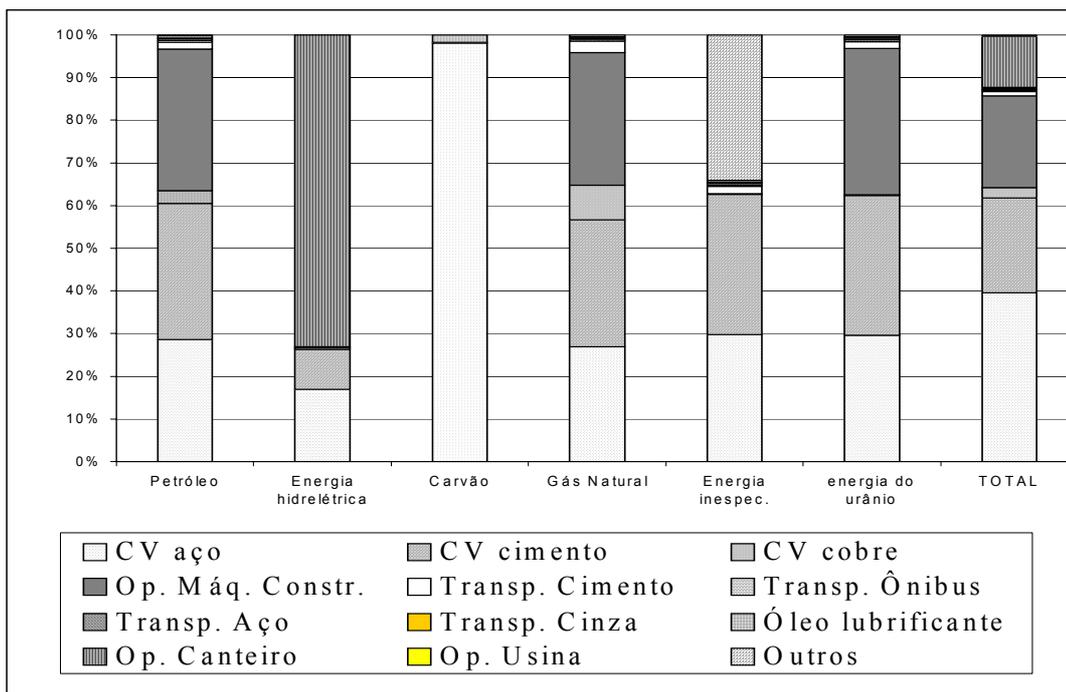


Figura 6.03- Contribuição percentual de cada processo em cada recurso energético.

Como se pode perceber, o ciclo de vida do aço participa de modo bastante intenso de diversos consumos, principalmente no carvão, mas também no petróleo, gás natural e outras fontes. O ciclo de vida do cimento também possui forte contribuição no consumo de petróleo, devido principalmente às distâncias transportadas.

Cabe dizer que os consumos de “energia do urânio” e grande parte do gás natural, “energia inespecífica”, carvão e até mesmo hidrelétrica são provenientes do ciclo de vida do petróleo, e portanto o consumo destas em alguns casos é proporcional ao consumo deste recurso natural.

Para a energia hidrelétrica, sem dúvida o principal consumo é da operação do canteiro, que necessitou de grande quantidade de eletricidade na britagem da rocha e na refrigeração dos constituintes do concreto, lançado a 6° C.

De um modo geral, as fontes de consumo de recursos energéticos, expressas na coluna “Total”, são:

- ciclo de vida do aço: 39,6%;
- ciclo de vida do cimento: 22,3%;
- operação das máquinas de construção: 21,4%;
- operação do canteiro: 12,0%;
- outros: 4,7%

Outro cálculo realizado com o consumo energético diz respeito ao consumo de energia para cada unidade de energia gerada, o chamado *pay-back* energético. Este, foi calculado usando o total de energia consumido ao longo do ciclo de vida de Itaipu. Considerando a potência instalada atual, antes da expansão, de 12,6 GW e o fator de capacidade de 78,5%, tem-se que a usina de Itaipu geraria os $7,93.10^{10}$ MJ ($2,20.10^7$ MWh) em cerca de 93 dias, ou seja, pouco mais de três meses. Este seria o tempo necessário para que a usina fornecesse a energia necessária a sua construção e operação por 100 anos, o que como comentado é um valor bastante reduzido.

m) Consolidação

De modo a permitir uma visualização mais ampla das contribuições de cada processo ao ciclo de vida de Itaipu, a Figura 6.04 a seguir apresenta os percentuais para cada aspecto na forma de um gráfico de barras.

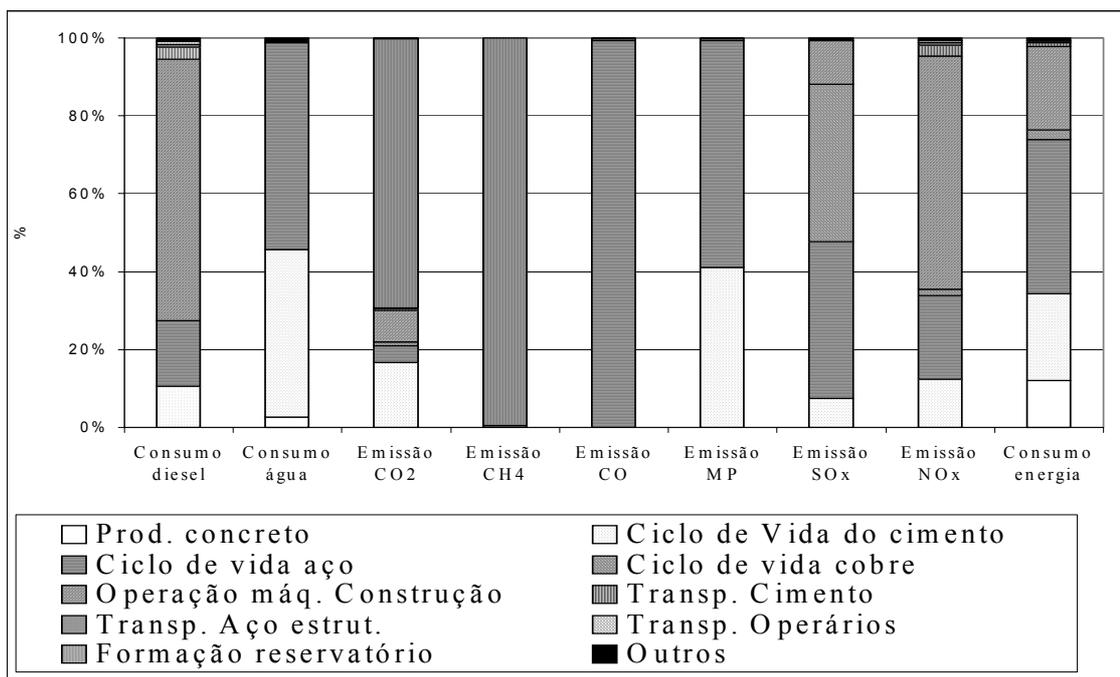


Figura 6.04- Contribuição dos processos aos aspectos selecionados.

Desta forma, pode-se perceber que grande parte dos aspectos possui forte presença do ciclo de vida do aço, que além de tudo é responsável por grande parte de outras emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos não

contabilizados neste Capítulo. Além disso, as máquinas de construção também aparecem como fontes relevantes de aspectos ambientais.

6.7 Considerações sobre as emissões veiculares

Além do ciclo de vida do aço, identificado anteriormente como importante contribuinte aos aspectos ambientais mais significativos, a operação das máquinas de construção e as diversas operações de transporte do ciclo de vida de Itaipu parecem ter relevância nos resultados do ICV.

Assim, do mesmo modo que para o consumo de energéticos, foi realizada uma avaliação específica dos resultados referentes à estes aspectos ambientais, identificando para todo o ciclo de vida, incluindo as etapas de transporte na obtenção dos insumos, os valores do consumo de diesel e das emissões atmosféricas.

A Tabela 6.09 apresenta estes valores.

Tabela 6.09- Comparação das emissões veiculares.

	Op máq construção (obra completa)		Transp. Caminhão (4,8E9 t.km)			Transp. Ferroviário (7,68E8 t.km)			Transp. Marítimo (2,09E10 t.km)			Transp. Ônibus (1,5E7 km)			TOTAL
	Valor Total (t)	%	Fator emissão (g/ t.km)	Valor total (t)	%	Fator emissão (g/ t.km)	Valor total (t)	%	Fator emissão (g/ t.km)	Valor total (t)	%	Fator emissão (g/ km)	Valor total (t)	%	
CO ₂	9,26E+05	61,33	18,21	87408	5,79	8,22E-01	6,31E+02	0,04	23,15	4,84E+05	32,04	801,8	12027	0,80	1,51E+06
CO	4,62E+03	71,82	0,06	288	4,48	4,68E-03	3,59E+00	0,06	0,07	1,46E+03	22,74	3,89	58,35	0,91	6,43E+03
SO _x	1,30E+03	14,35	0,005	24	0,26	2,53E-03	1,94E+00	0,02	0,37	7,73E+03	85,33	0,204	3,06	0,03	9,06E+03
NO _x	1,26E+04	54,75	0,223	1070,4	4,65	1,75E-02	1,34E+01	0,06	0,44	9,20E+03	39,96	8,96	134,4	0,58	2,30E+04
PM ₁₀	8,73E+02	90,51	0,014	67,2	6,97	7,77E-04	5,97E-01	0,06	7,00E-04	1,46E+01	1,52	0,604	9,06	0,94	9,64E+02
Fuligem		0,00	0,066	316,8	87,82	7,20E-04	5,53E-01	0,15			0,00	2,892	43,38	12,03	3,61E+02
COV		0,00	0,05	240	90,95	0,003555	2,73E+00	1,03			0,00	1,41	21,15	8,01	2,64E+02
N ₂ O		0,00	0,001	4,8	91,43			0,00			0,00	0,03	0,45	8,57	5,25E+00
CH ₄		0,00	2,10E-03	10,08	90,64	1,25E-04	9,60E-02	0,86			0,00	0,063	0,945	8,50	1,11E+01
1,3 Butadieno		0,00	1,90E-04	0,912	73,07	2,97E-04	2,28E-01	18,28			0,00	0,0072	0,108	8,65	1,25E+00
Benzeno		0,00	6,90E-04	3,312	88,59	6,45E-06	4,95E-03	0,13			0,00	0,0281	0,4215	11,27	3,74E+00
Chumbo		0,00			0,00	1,92E-07	1,47E-04	100,00			0,00			0,00	1,47E-04
Mercúrio		0,00			0,00	9,59E-11	7,37E-08	100,00			0,00			0,00	7,37E-08
HC	8,45E+02	50,27			0,00			0,00	0,04	8,36E+02	49,73			0,00	1,68E+03
Aldeídos	3,03E+02	100,00													3,03E+02

Os percentuais da Tabela 6.07 são representados na Figura 6.05.

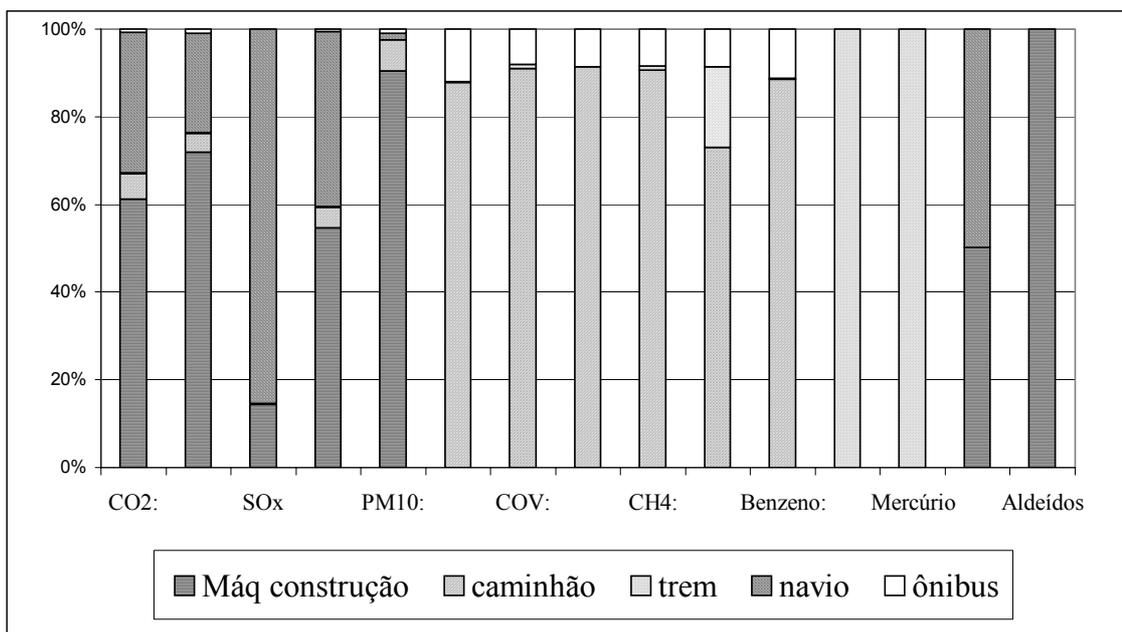


Figura 6.05- Contribuições percentuais ao consumo de diesel e emissões veiculares.

Como se pode notar na Figura 6.05, as principais contribuições percentuais às emissões veiculares são provenientes da operação das máquinas de construção, seguidas do transporte marítimo. As exceções notadas dizem respeito a parâmetros não contabilizados nestas fontes, e não devem alterar a percepção de quem avalia os dados apresentados. Ademais, deve-se ressaltar ainda que para os parâmetros relacionados a componentes orgânicos não há uniformidade de critério de contabilização.

Uma vez que há uma forte predominância das emissões dos equipamentos de construção civil de Itaipu nas emissões veiculares, decidiu-se levantar os percentuais de contribuição sem sua inclusão. A Tabela 6.10 apresenta esta estimativa.

Tabela 6.10- Comparação das emissões veiculares, sem incluir as máquinas de construção

	Transp. Caminhão (4,8E9 t.km)			Transp. Ferroviário (7,68E8 t.km)			Transp. Marítimo (2,09E10 t.km)			Transp. Ônibus (1,5E7 km)			TOTAL
	Fator emissão (g/t.km)	Valor total (t)	%	Fator emissão (g/t.km)	Valor total (t)	%	Fator emissão (g/t.km)	Valor total (t)	%	Fator emissão (g/km)	Valor total (t)	%	
CO ₂	18,21	87408	14,97	8,22E-01	6,31E+02	0,11	23,15	4,84E+05	82,86	801,8	12027	2,06	5,84E+05
CO	0,06	288	15,89	4,68E-03	3,59E+00	0,20	0,07	1,46E+03	80,70	3,89	58,35	3,22	1,81E+03
SO _x	0,005	24	0,31	2,53E-03	1,94E+00	0,03	0,37	7,73E+03	99,63	0,204	3,06	0,04	7,76E+03
NO _x	0,223	1070,4	10,28	1,75E-02	1,34E+01	0,13	0,44	9,20E+03	88,30	8,96	134,4	1,29	1,04E+04
PM ₁₀	0,014	67,2	73,45	7,77E-04	5,97E-01	0,65	7,00E-04	1,46E+01	15,99	0,604	9,06	9,90	9,15E+01
Fuligem	0,066	316,8	87,82	7,20E-04	5,53E-01	0,15			0,00	2,892	43,38	12,03	3,61E+02
COV	0,05	240	90,95	0,003555	2,73E+00	1,03			0,00	1,41	21,15	8,01	2,64E+02
N ₂ O	0,001	4,8	91,43			0,00			0,00	0,03	0,45	8,57	5,25E+00
CH ₄	2,10E-03	10,08	90,64	1,25E-04	9,60E-02	0,86			0,00	0,063	0,945	8,50	1,11E+01
1,3 Butadieno	1,90E-04	0,912	73,07	2,97E-04	2,28E-01	18,28			0,00	0,0072	0,108	8,65	1,25E+00
Benzeno	6,90E-04	3,312	88,59	6,45E-06	4,95E-03	0,13			0,00	0,0281	0,4215	11,27	3,74E+00
Chumbo			0,00	1,92E-07	1,47E-04	100,00			0,00			0,00	1,47E-04
Mercúrio			0,00	9,59E-11	7,37E-08	100,00			0,00			0,00	7,37E-08
HC			0,00			0,00	0,04	8,36E+02	100,00			0,00	8,36E+02
Aldeídos													

Os dados da Tabela 6.10 vêm confirmar que dentre as etapas de transporte o modal marítimo é sem dúvida o que apresenta maiores contribuições, devido evidentemente às enormes distâncias percorridas. Este fato é de extrema importância, visto que em muitos estudos de ACV não se incluem estas etapas de transporte marítimo a longas distâncias e esta constatação indica que podem estar sendo cometidas simplificações equivocadas nestes casos.

Uma observação interessante é que se compararmos o transporte ferroviário com o transporte rodoviário de cargas, nota-se que as emissões das locomotivas medidas em quantidade de poluentes por quilômetro percorrido, apresentadas na Tabela E.11 do Anexo E, podem chegar a ser 100 vezes maiores que os mesmos parâmetros para caminhões, apresentados na Tabela E.08, do mesmo Anexo. No entanto, tem-se que a capacidade de carga de cada locomotiva é mais de 200 vezes maior que a de um caminhão, o que torna o transporte ferroviário muito mais eficiente em termos ambientais, como pode ser notado nos valores em t.km expressos na Tabelas E.14.

Ainda sobre as emissões veiculares, de modo a fornecer sensibilidade à ordem de grandeza dos valores das emissões veiculares do ciclo de vida de Itaipu, decidiu-se realizar uma breve e simplificada comparação dos dados consolidados na Tabela 6.07 com um referencial, para o qual escolheu-se as emissões veiculares da Região Metropolitana de São Paulo, quantificadas no Relatório de Qualidade do Ar divulgado pela CETESB (CETESB, 2002). A Tabela 6.09 apresenta os valores originais deste relatório, onde são quantificadas as emissões veiculares dos escapamentos (“tubo de escapamento de veículos), da evaporação no veículo (carter e evaporativas”), do desgaste dos pneus no asfalto (“pneus”), e da evaporação ocorrida nas diversas operações de transferência de combustíveis (“transferência de combustíveis”).

Tabela 6.11- Dados de emissões atmosféricas de fontes móveis para a RMSP (CETESB, 2002)

fontes móveis de emissão para a RMSP		Emissões (mil t/ ano)				
		CO	HC	NOx	SOx	MP
tubo de escapamento de veículos	gasolina	780,8	82,5	44,4	10,2	5,1
	álcool	207,5	23,1	12,7	-	-
	diesel	433,3	70,6	316,5	10,9	19,7
	taxi	3,5	7	0,7	0,4	0,2
	motos	217,5	28,7	1,1	0,8	0,6
cárter e evaporativas	gasolina	-	131,6	-	-	-
	álcool	-	17,3	-	-	-
	motos	-	15,5	-	-	-
pneus		-	12	-	-	8,1
transferência combustíveis	gasolina	-	0,6	-	-	-
	álcool	-	0,4	-	-	-
Total fontes móveis		1642,6	389,3	375,4	22,3	33,7

Cabe destacar que estes valores dizem respeito à uma área metropolitana de aproximadamente 8.000 km², onde além de cerca de 18 milhões de habitantes e intensa atividade industrial circulam uma média de 6 milhões veículos leves e grande número de veículos de carga (CETESB, 2002).

De modo a comparar os valores da Tabela 6.09 com as emissões veiculares do ciclo de vida de Itaipu para o período de análise de 100 anos, tomou-se os valores da Tabela 6.07, considerando as emissões de fuligem e PM₁₀ somadas como material particulado (MP), e as emissões de HC e CH₄ somadas como HC. Fazendo os cálculos, obteve-se valores das emissões veiculares de Itaipu em dias equivalentes da emissão de fontes móveis para a RMSP no ano de 2001. A Tabela 6.10 a seguir apresenta estes resultados.

Tabela 6.12- Comparação de emissões veiculares (adaptado de CETESB, 2002).

Emissões (mil t)	Total Ciclo Vida Itaipu 100 anos	Total fontes móveis RMSP (2001)	Emissão de Itaipu (dias equiv. emissão fontes móveis RMSP- 2001)
CO	6,43	1642,6	1,4
HC	1,69	389,3	1,6
NOx	23	375,4	22,4
SOx	9,06	22,3	148,3
MP	1,32	33,7	14,3

Como se pode notar na Tabela 6.10, o caso onde há o maior número de dias equivalentes refere-se à emissão de SO_x, que apresenta o valor de 148,3 dias, ou seja, pouco mais de quatro meses.

Em termos dos impactos ambientais das emissões de Itaipu, há ainda que se considerar que elas ocorreram em uma área que à época era distante de qualquer outra grande fonte emissora, uma vez que a obra de Itaipu foi realizada numa área de baixa ocupação demográfica e de muito reduzida ocupação industrial. Ademais, exceto pelas emissões das máquinas de construção, as emissões veiculares do ciclo de vida de Itaipu ocorreram distribuídas ao longo de centenas de quilômetros de estradas, ao contrário das emissões da RMSP, o que favorece a dispersão dos poluentes.

6.8 Comparação simplificada dos dados com outra forma de geração de eletricidade

Em último lugar nestas considerações, julgou-se pertinente comparar os resultados deste estudo com outra forma de geração de eletricidade, para o que se decidiu usar a geração termelétrica a gás natural como comparativo.

Para tanto, tomou-se dois tipos de dados. Primeiramente buscou-se dados de ciclo de vida de eletricidade produzida em Usinas Termelétricas, para o que, na inexistência de dados nacionais, usou-se dados de dois estudos europeus, encontrados nas bases do SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003). Estes são:

- base “Electricity from gas B250”, do BUWAL, com dados de 1990 a 1994, de geração de eletricidade a partir do gás natural, representativos da média deste tipo de geração para a Europa, e
- base “Electricity power plant in UCPTE”, do ETH, com dados de 1990 a 1994, de geração de eletricidade a partir do gás natural, representativos da média deste tipo de geração para os países da UCPTE.

Uma vez que estes dados não necessariamente representam a realidade brasileira, decidiu-se apresentar alguns valores apenas das emissões da operação de usinas termelétricas brasileiras. Para tanto, utilizou-se um estudo realizado pela CETESB (LUCON, 2001) onde são apresentados, consolidados e calculados as emissões por MWh de quatro usinas termelétricas, obtidas dos estudos e relatórios de impacto ambiental (EIA/ RIMA) encaminhados com o fim de licenciamento ambiental. Estes estudos, segundo a referência, são:

- EIA/ RIMA da Usina Termelétrica do Planalto Paulista (TPP);

- EIA/ RIMA da Central de Cogeração da Baixada Santista (CCBS);
- EIA/ RIMA da Usina Piratininga- Unidades 5 e 6 (Piratininga);
- Relatório Ambiental Preliminar (RAP) da Usina Termelétrica Bom Jardim (Bom Jardim).

Os dados das emissões são apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.13- Comparação de alguns aspectos ambientais do ciclo de vida de Itaipu com a operação de usinas termelétricas paulistas.

Aspecto	Um.	ICV Itaipu (100 anos)	BUWAL	ETH	Bom Jardim	Piratininga	TPP	CCBS
Água	kg/ MWh	8,90	-	2.199	990	10	1.250	6.210
NOx	kg/ MWh	0,003	1,49	1,49	0,675	0,405	0,240	0,499
SOx	kg/ MWh	0,004	0,265	0,210	0,005	0	0,023	0,043
MP	kg/ MWh	0,025	0,0652	0,0576	0,030	0	0,016	0,019
CO	kg/ MWh	0,112	0,267	0,295	0,563	0,071	0,160	0,318
CO2	kg/ MWh	1,56	767	884	112	166	149	102
CH4	kg/ MWh	0,132	1,76	1,35	10,5	15,6	14,0	9,7

Como se pode notar os valores referentes a todo o ciclo de vida de Itaipu são bastante reduzidos em comparação com os dados levantados apenas para a etapa de operação das usinas termelétricas, o que indica uma possibilidade de que em relação a estes parâmetros haja vantagens ambientais da geração hidrelétrica sobre a termelétrica.

6.9 Considerações sobre o uso dos dados deste ICV em estudos de ACV de produtos

Uma vez que o intuito deste estudo é obter um ICV da eletricidade gerada no Brasil para uso em estudos de ACV de produtos que utilizem eletricidade do SIN, considerou-se de interesse verificar um exemplo deste uso, ainda que muito superficialmente.

Para tanto, selecionou-se um dos poucos estudos de ACV de produtos disponibilizados no Brasil, a ACV a cerveja produzida em um unidade industrial do Estado de São Paulo (RIBEIRO, MARTINS, 2001), e tomou-se como indicador desta avaliação as emissões de CO₂, uma vez que como apontado na Revisão Bibliográfica este é usualmente tido como o principal aspecto ambiental do ciclo de vida das hidrelétricas, além do que foi selecionado neste Capítulo como um dos aspectos mais significativos do ICV de Itaipu.

Segundo este estudo (RIBEIRO, MARTINS, 2001) no ciclo de vida da cerveja estudado, consome-se 541,9 MJ/ hl de cerveja, dos quais 250,47 MJ/ hl são de energia elétrica, sendo 35,47 MJ/ hl consumidos da rede e os demais 215,0 MJ/ hl obtidos na própria planta em uma instalação de cogeração a gás natural. Segundo os valores apresentados, este processo gera emissões de 1,50 kg CO₂/ hl.

A comparação que decidiu-se fazer aqui representa variação nestas emissões de CO₂ caso a eletricidade fosse totalmente fornecida pela rede elétrica, admitindo o ICV de Itaipu como perfil ambiental da geração elétrica brasileira.

No caso do ICV de Itaipu, temos na Tabela 6.4 o total de 4,33 kg CO₂ eq./ MWh de eletricidade (ou $1,194 \cdot 10^{-3}$ kg CO₂ eq./ MJ). Aplicando este valor às quantidades de eletricidade consumidas na atual configuração do ciclo de vida da cerveja e para o caso de substituição total da cogeração temos:

- Caso A: 35,47 MJ/hl, de eletricidade da rede + 1,50 kg CO₂/ hl da cogeração:
 - Total= $35,47 \cdot (1,194 \cdot 10^{-3}) + 1,50 = 1,152 + 1,50 = 2,16$ kg CO₂ eq./ hl;
- Caso B: 250,47 MJ/ hl , de eletricidade da rede:
 - Total= $250,47 \cdot (1,194 \cdot 10^{-3}) = 0,299$ kg CO₂ eq./ hl.

Como se pode perceber, a incorporação dos valores do ICV de Itaipu apresentou uma redução significativa nas emissões de CO₂ do ciclo de vida da cerveja. Além de indicar uma possível melhoria ambiental do processo com o uso de hidreletricidade ao invés da cogeração, que precisaria de estudos mais detalhados para poder ser afirmada com confiabilidade, este resultado permite outra observação.

O que se pretende demonstrar aqui é que mesmo o aspecto ambiental tido como principal no ciclo de vida da hidreletricidade apresenta-se muito pouco relevante quando inserido em um ciclo de vida de produto, ou seja, em comparação às contribuições dos demais processos e ciclos de vida de insumos, a eletricidade pouco acrescenta. Em outras palavras, ao ser inserido em estudos de ACV é bem capaz que grande parte dos aspectos ambientais deste ICV seja considerada desprezível, o que não tira o mérito deste estudo ou do uso deste ICV, mas sim aponta para uma possibilidade de que maiores esforços na obtenção de dados mais precisos possam vir a ser de pouca efetividade na prática.

6.10 Principais limitações das estimativas realizadas

Como extensivamente apresentado em todas as estimativas deste trabalho, o levantamento de dados realizado possui inúmeras limitações. Estas se devem tanto ao próprio contexto de realização deste estudo, relativas aos recursos humanos e financeiros e de tempo de execução, como às condições de disponibilidade de dados brasileiras, sabidamente precárias.

Antes de partir à apresentação e discussão destas limitações no entanto, cabe uma ressalva sobre uma limitação da metodologia aplicada neste estudo. Por tratar-se de um ICV, e não de uma ACV completa, pode-se afirmar que o que se aborda são fluxos de matéria e energia, ou seja, aspectos ambientais, e não impactos.

Além disso, deve-se ressaltar que, no atual estágio de desenvolvimento metodológico da ACV, ainda não há consenso sobre metodologias para incorporar alguns tipos de impactos ambientais admitidos como importantes para usinas hidrelétricas: aqueles oriundos da alteração do meio físico, com conseqüentes efeitos na sociedade, economia e ecossistemas.

Desta forma, apenas registra-se neste estudo o valor da área alterada, tendo nos Anexos informações sobre seu uso anteriormente à obra de Itaipu. Assim, não se recomenda o uso indiscriminado dos resultados aqui apresentados para tomadas de decisão sem o uso complementar de metodologias que abordem impactos sobre o meio físico e social.

Tendo isto dito, pode-se afirmar que a maioria das limitações das estimativas em si já se encontra extensivamente apontada ao longo das próprias estimativas, principalmente no Capítulo 5 e nos Anexos C, D e E. Recomenda-se fortemente que qualquer usuário deste estudo tenha atenção especial a estas hipóteses antes de aplicar os resultados aqui apresentados e discutidos, bem como antes de considerar as conclusões a serem feitas no próximo Capítulo.

No entanto, com o intuito de reforçar a atenção a algumas destas hipóteses, a seguir são listados algumas das principais limitações encontradas, divididas em limitações quanto às fronteiras adotadas e quanto à qualidade dos dados utilizados.

6.10.1 Limitações das fronteiras adotadas

Deve-se ressaltar que a maior parte dos processos e materiais não considerados nas fronteiras, e a seguir listados, não foram incluídos por serem julgados, baseados na experiência internacional e em estimativas preliminares, pouco relevantes. Desta forma, antes de qualquer inclusão indiscriminada, recomenda-se uma avaliação da pertinência de sua incorporação.

Isto posto, os principais processos e fluxos excluídos das fronteiras são:

- construção e operação da infra-estrutura residencial do canteiro;
- fabricação dos equipamentos permanentes;
- transporte dos equipamentos permanentes;
- transporte do petróleo brasileiro;
- consumo de explosivos;
- emissões de particulados no uso dos explosivos, nas obras de escavação e na operação do canteiro de obras;
- uso do solo na mineração do carvão e do ferro;
- estimativa de outros materiais usados na usina (cobre de fiação, tubulações, etc), e
- uso de produtos químicos na construção e operação da usina (tratamento de água, limpeza, etc).

Vale dizer que sempre devemos considerar a magnitude tanto dos principais consumos como da energia gerada ao longo do ciclo de vida, o que faz com que o consumo de produtos, insumos, materiais e substâncias em pequenas quantidades seja considerado quase sempre como insignificante.

6.10.2 Limitações da qualidade dos dados utilizados.

Além das limitações devidas aos processos e materiais excluídos das fronteiras, e que consistem uma limitação do escopo do estudo, há uma outra classe de limitação, relacionada à qualidade dos dados utilizados. Estas igualmente são detalhadamente descritas ao longo dos Anexos deste estudo, mas novamente cabe ressaltar algumas destas limitações.

Ao contrário do caso dos processos excluídos da fronteira, aqui a maioria das limitações resulta da falta de informações disponíveis. Embora tenha-se certeza de

que estas foram, dadas as limitações de tempo e recursos deste estudo, as melhores estimativas possíveis, recomenda-se que estas sejam atualizadas por valores de maior confiabilidade assim que possível.

Cabe lembrar que os estudos internacionais semelhantes à ACV de hidrelétricas, avaliados por RIBEIRO (2003), usam dados primários na estimativa dos consumos de insumos, mas nos ciclos de vida destes são aplicadas bases de dados próprias para ACV, com dados atuais e não necessariamente representativos das condições da época dos estudos. Neste sentido, o presente ICV de Itaipu apresenta-se utilizando dados de maior qualidade, uma vez que, na medida do possível, foram usados dados de processos da época da construção da usina.

Isto posto, uma primeira, e talvez a principal limitação dos resultados quanto à qualidade de dados é a estimativa da quantidade de energia gerada pela usina dentro do período de análise. Como apontado no Anexo D, esta estimativa possui três momentos: num primeiro adota-se a quantidade que já foi gerada, que é um dado primário obtido junto à empresa (ITAIPU BINACIONAL, 2003), totalmente confiável. No segundo e terceiro momentos no entanto, aplica-se uma média do fator de capacidade dos últimos dez anos para as potências instaladas antes e depois da expansão, pelos respectivos anos até o final do horizonte de análise. Este procedimento, embora seja o único possível dado os limites de informações disponíveis, poderia ser melhorado com o uso de estimativas realizadas a partir de previsões da própria empresa, baseadas em índices pluviométricos, previsões de paradas para manutenção, etc. No entanto, deve-se ressaltar, a quantidade de energia gerada sempre estará atrelada a uma série de variáveis imponderáveis.

Outra estimativa bastante relevante de ser atualizada é a emissão de gases de efeito estufa pelo reservatório, como já extensivamente repetido durante o capítulo do Anexo E que trata deste aspecto.

Sem repetir todos os argumentos e justificativas deste, cabe dizer apenas que o tema ainda é de grande controvérsia, e embora tenha-se utilizado dados divulgados em relatório do próprio MCT- Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2002), estes foram baseados em estudos que a própria usina não considera conclusivos (ZENHPFENNIG, 2003). Fica portanto a sugestão de que futuros pesquisadores

avancem nesta questão, considerada imprescindível no debate de ACV de usinas hidrelétricas.

Um consumo que pode vir a ser importante, mas que não foi incorporado simplesmente por ausência de dados é a reposição de óleo de transformador e óleo lubrificante ao longo da operação da usina. Embora a empresa afirme que estes serão recuperados e reutilizados, há que se constatar no futuro se esta afirmação se confirma, e se no processo de recuperação não é gerado nenhum aspecto ambiental de relevância.

Outro processo que isoladamente mostrou-se de grande importância, principalmente tendo em vista suas contribuições aos aspectos selecionados, é a operação das máquinas de construção. Sobre as estimativas de seus aspectos ambientais, cabe dizer que há diversas limitações, que inevitavelmente levam à recomendação de refinamento destes dados no futuro.

Primeiramente, deve-se dizer que as estimativas de todos os aspectos estão relacionadas à quantidade de combustível consumida, uma vez que este foi o único dado quantificado sobre o uso das máquinas encontrado. Este valor no entanto não foi obtido de nenhum documento oficial, e sim de um artigo da época do início da obra relatando alguns consumos de Itaipu (CAVALCANTI, 1979), o que em si já agrega grande incerteza.

Outra simplificação realizada foi a distribuição deste consumo de diesel entre os diferentes equipamentos pela potência de cada um, o que consiste numa estimativa bastante aproximada, pois admite que todos os equipamentos foram usados com a mesma taxa de utilização, o que certamente não é correto.

Uma melhor estimativa relacionada a estas duas hipóteses poderia ser obtida caso fossem disponibilizados os planos de uso das máquinas, com volumes e tempos de operação de cada uma. Certamente estes dados foram produzidos, mas resta saber se foram armazenados até hoje e onde se encontram.

Quanto aos fatores de consumo e emissão de cada equipamento utilizado, o que de certo modo também se aplica aos meios de transporte, tem-se que além de não se ter garantias de que os valores adotados pela EPA ou pelo governo britânico são válidos para o Brasil, deve-se considerar que estes parâmetros são extremamente sensíveis ao modo de operação. Isso significa que, em função da carga submetida, modo de

dirigibilidade, entre outros fatores, podem haver significativas variações do consumo e das emissões. Este fator no entanto é inerente ao uso de fatores de emissão deste tipo.

Além destes pontos abordados, diversos outros dados ao longo do estudo tiveram estimativas simplificadas, o que pode ter levado a certo grau de erro nos resultados. No entanto buscou-se, na medida do possível, utilizar valores que se não apresentassem desvios significativos.

Sobre o ciclo de vida do cimento e do aço por exemplo, podemos apresentar como limitação na qualidade dos dados o uso de informações dos setores para o Brasil na época de construção da usina, o que não necessariamente representa aqueles usados por Itaipu, embora mostrem uma forte tendência.

Na verdade, este fato não parece trazer grandes desvios da realidade, uma vez que na década de setenta era comum às grandes obras realizar a distribuição de seu fornecimento de acordo com a capacidade de produção dos fornecedores, segundo JOHN (2003). No entanto, para que se tenha garantia desta representatividade dos tipos de processos considerados aqui seria interessante uma pesquisa junto às empresas de modo a levantar as tecnologias utilizadas à época.

Embora este fato pareça ser de pouca importância, deve-se considerar que houve grande dificuldade de obtenção dos dados de quantificação dos processos destes ciclos de vida para a época de construção da usina, o que resultou em estimativas com uma enorme quantidade de fontes distintas, diferentes critérios de quantificação, uso de dados atuais misturados a dados antigos e, em alguns casos, ausência de dados.

Estas características trazem às estimativas incertezas sobre sua qualidade, e deve-se ressaltar a importância de buscar-se dados mais confiáveis e homogêneos sobre estes processos. No entanto, deve-se ressaltar, à época era pouco comum a realização de avaliações ambientais profundas e extensas sobre os processos, o que faz com que em alguns casos realmente não existam estas informações.

Ainda com todas estas limitações, cabe dizer que se considera as estimativas realizadas neste estudo para os ciclos de vida do cimento e do aço bastante representativas e seus resultados de qualidade. Para que estes sejam melhorados no

entanto, recomenda-se sejam verificados os principais pontos indicados ao longo das estimativas do Anexo E.

Outra consideração importante é a estimativa dos consumos relacionados aos equipamentos permanentes. Uma vez que sua instalação, manutenção e substituição consomem grandes quantidades de aço, é de grande importância que se estime com precisão seu consumo deste insumo.

Para tanto, recomenda-se verificar junto à empresa dados mais específicos de projeto, como por exemplo os desenhos de conjunto dos equipamentos eletro-mecânicos, onde sem dúvida devem estar indicadas as quantidades de cada material. Além disso, propõe-se recorrer aos projetistas destes equipamentos para verificação da vida útil e taxa de manutenção de projeto destes equipamentos.

Uma última consideração, não tão relevante dadas as considerações sobre suas reduzidas contribuições totais, é a estimativa das distâncias transportadas. Além de em muitos casos não se ter a quantidade correta de material a transportar, e em diversos casos a medição das distâncias não ser seguramente a da rota adotada, há o fato de só se ter considerado a viagem de ida dos caminhões e trens, admitindo que na volta estes transportarão outros produtos, o que nem sempre é verdade.

Além destas limitações, uma dificuldade evidente na agregação e discussão dos resultados advém da diversidade de critérios para registro dos aspectos entre as fontes de informação. Esta limitação não afeta diretamente o ICV de Itaipu, mas dificulta o uso e a interpretação de seu resultado, o que pode-se dizer, constitui certo grau de limitação.

Na verdade, como se pode notar, muitos destas limitações seriam solucionadas com o uso de bases de dados nacionais, com informações consolidadas de modo homogêneo e criterioso, válidas para a realidade brasileira. Esta percepção apenas vem reforçar a justificativa de realização não só deste projeto, mas sim de todo o projeto de desenvolvimento e disponibilização das bases de dados brasileiras para ACV.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Uma vez que os resultados do ICV de Itaipu foram obtidos, apresentado e discutidos, cabem aqui algumas conclusões a seu respeito. Neste sentido, este último capítulo do documento visa apresentar estas conclusões, divididas em temas específicos, para em seguida estabelecer algumas recomendações para futuros estudos, tanto quanto ao refino deste ICV como para outros estudos de ACV de hidrelétricas, e mesmo de ACVs em geral, que se venham a realizar.

Ao final, encerra-se o trabalho com comentários sobre o atendimento aos objetivos inicialmente propostos e sobre a realização do trabalho como um todo.

7.1 Conclusões gerais sobre a realização da discussão dos resultados

Antes de tecer quaisquer conclusões sobre os principais resultados obtidos, cabe apresentar uma conclusão obtida da experiência de discutir estes resultados.

Uma vez que este trabalho consiste num ICV de Itaipu, não foi realizada neste estudo a etapa de “avaliação de impactos” da metodologia da ACV. Esta limitação foi estabelecida logo de início, uma vez que sendo o propósito deste estudo a contribuição a bancos de dados não caberia nenhuma consideração de juízo de valores sobre os resultados do ICV. Esta decisão, sobre a qual serão posteriormente feitas algumas recomendações, introduziu certa dificuldade na discussão dos resultados, onde o estabelecimento de juízos de valores é inevitável.

O que se pode perceber é que, na ausência de uma metodologia que forneça critérios para reduzir a subjetividade deste tipo de considerações, como a metodologia proposta para a etapa de “avaliação de impactos”, o processo de consideração de relevância ambiental dos aspectos torna-se não apenas incerto, mas incompleto.

Uma das principais dificuldades neste sentido, já relatada no Capítulo anterior, é a diversidade de formas de apresentação de dados utilizadas entre as diferentes fontes de informação. Este fato influenciou e limitou bastante as possibilidades de discussão de resultados, sendo que apenas aqueles aspectos notoriamente prioritários puderam ser abordados.

Este fato leva a duas conclusões. Primeiramente, que a possibilidade de priorização de aspectos e processos de um ICV é bastante limitada quando não realizada a etapa

de Avaliação de Impactos. Em segundo lugar, que um fator de extrema relevância em estudos de ICV é a homogeneidade de critérios de levantamento de dados entre as fontes utilizadas, o que parece óbvio, mas nem sempre possível.

Uma outra conclusão a este respeito, que é fruto da observação das tabelas de consolidação de ICV de insumos e da usina, é que a quantidade de aspectos ambientais do ICV tende a aumentar à medida que se incorporam novos ICVs parciais. Isso ocorre pois quando não há uniformidade de definições, os ICVs são desenvolvidos com diferentes níveis de detalhamento. Desta forma, alguns ICVs possuem aspectos ambientais em quantidades ínfimas, enquanto outros possuem critério de corte mais restritivo.

Por exemplo, no transporte em navio petroleiro considerado nos Anexos há diversos aspectos ambientais relativos à construção do navio e refino do petróleo na Europa, como o consumo de urânio para geração de energia nuclear. Se no ICV do diesel considerarmos o transporte de petróleo desde o Oriente Médio, incorporaremos no ICV de Itaipu um aspecto relativo ao consumo de urânio.

Assim, diversos ICVs possuem alguns aspectos particulares a si, e quanto mais ICVs parciais são incorporados, maior é a tendência de aumento dos aspectos. No entanto em muitos casos estes aspectos representam “traços” do que eram anteriormente, podendo apenas agregar “tamanho” ao ICV sem significado real em termos de impactos. Conclui-se daí a necessidade de critérios de corte.

Um forte indício deste fato é que a maioria dos aspectos quantificados na Tabela 6.02, principalmente quanto a emissões atmosféricas e efluentes líquidos, possuem valores mínimos. Para as emissões atmosféricas, a soma das emissões dos seis aspectos considerados relevantes (CO₂, CH₄, CO, Material Particulado, NO_x e SO_x) equivale em massa a 99,83% das emissões atmosféricas, apresentadas por vinte e oito parâmetros. Para os efluentes líquidos, embora não avaliados quanto à relevância ambiental por deficiência de informações, temos trinta e quatro aspectos quantificados, mas a soma dos quatro de valor mais elevado (ácido acético, alcatrão, inorgânicos gerais e metanol) equivale a 98,28% do total dos poluentes ao meio hídrico.

Esta simplificação não significa que outros aspectos em menor quantidade não possam ter contribuições significativas aos impactos ambientais do ciclo de vida de

Itaipu, mas indica que muitos aspectos poderiam ser considerados de pouca importância se fosse realizada a etapa de avaliação de impactos.

Embora esta afirmativa seja evidente, é de grande importância que seja relatada de modo explícito, pois muitas vezes temos um aspecto tido como relevante num dado ciclo de vida de insumo, este pode vir a se tornar insignificante quando incorporado num ICV de um produto que, por exemplo, utiliza um insumo que consumiu outro insumo para sua produção, etc.

7.2 Conclusões gerais sobre os valores obtidos

Uma conclusão de grande importância diz respeito à determinação do horizonte de análise em estudos de ACV de hidrelétricas. Como pode ser percebido na Tabela 6.03, a grande maioria dos aspectos é bastante sensível ao horizonte de análise, o que confirma a hipótese inicial de que este parâmetro é de extrema importância neste tipo de estudo. Na verdade esta variação se deve à diferença na energia gerada, que determina a variação dos valores por unidade funcional (MWh). Ou seja, pode-se concluir que a determinação do horizonte de análise, e portanto da energia gerada neste período, é um parâmetro de suma importância, talvez o mais importante de todos a serem estabelecidos.

Outra conclusão geral, obtida da comparação dos aspectos para diferentes horizontes de análise, é a de que os valores dos aspectos ambientais não variam na mesma proporção da variação do tempo, ou seja, não acompanham proporcionalmente esta variação. A conclusão que se pode estabelecer deste fato é que realmente a etapa de construção da usina possui, de modo geral, grande participação sobre a maioria dos aspectos ambientais. Esta afirmação é confirmada quando se verifica, nos aspectos listados no ICV da Tabela 6.02, a participação percentual da etapa de construção da usina no total do ciclo de vida. Salvo em poucas exceções, ligadas ao consumo de cobre, emissão de gases de efeito estufa pelo reservatório e uso do solo, todos os demais aspectos ambientais possuem sua principal contribuição oriunda da construção da usina.

Esta constatação confirma a hipótese de que os principais aspectos ambientais de uma hidrelétrica se devem à sua construção, sendo no caso deste estudo é possível

acrescentar a esta afirmação a importante ressalva das exceções: o uso de cobre e os efeitos da formação do reservatório.

Seguindo com as discussões realizadas sobre a discussão dos resultados, é importante ressaltar a comparação de alguns aspectos ambientais deste estudo com outros de trabalhos similares realizados internacionalmente. Primeiramente, cabe reforçar a colocação realizada anteriormente, que a ordem de grandeza dos valores para Itaipu encontram-se dentro do encontrado em outros trabalhos, o que indica uma grande probabilidade de coerência das estimativas aqui realizadas.

Outra observação sobre esta comparação, também já realizada mas que merece atenção, trata dos valores específicos da usina de Itaipu, que mostram-se em diversos casos como bastante inferiores a média dos demais estudos. Este fato parece indicar que no caso de Itaipu ocorre o que se chamou de “economia de escala”, ou seja, devido à enorme quantidade de energia gerada pela usina, as quantidades dos aspectos ambientais por unidade de energia são bastante reduzidas, não obstante sua magnitude absoluta. Esta verificação induz à conclusão de que a usina de Itaipu é, comparada a outras hidrelétricas de menor tamanho, bastante eficiente no uso de recursos e insumos, e portanto pode-se dizer, possui um excelente desempenho ambiental quanto aos parâmetros aqui avaliados.

Sobre a seleção dos aspectos ambientais mais relevantes, devido à ausência da etapa de avaliação de impactos, da metodologia da ACV, não foi possível obter nenhuma informação conclusiva, apenas sendo possível obter indicações de prováveis aspectos relevantes, por meio da aplicação de critérios de massa e energia e da seleção de alguns aspectos usualmente quantificados em estudos de ACV de hidrelétricas. Desta forma, sobre esta etapa não se pretende estabelecer qualquer conclusão.

7.3 Conclusões a respeito das contribuições dos processos do ciclo de vida ao ICV

A respeito dos chamados *hot spots*, ou seja, processos que contribuem com grande intensidade aos aspectos ambientais do ICV, mesmo dadas as limitações, é possível realizar comentários e estabelecer algumas conclusões de interesse. Deve-se ressaltar que os resultados obtidos neste estudo permitem que se estabeleçam indicações

destes *hot spots*, sendo que para sua confirmação seria necessário a condução de uma avaliação de impactos.

Considerando as contribuições percentuais apresentadas na discussão dos resultados do Capítulo 6, é possível estabelecer que há grande probabilidade de que os principais processos no ciclo de vida de Itaipu, e talvez das hidrelétricas em geral, sejam: formação do reservatório, ciclo de vida do aço, ciclo de vida do cimento e operação das máquinas de construção. Além disso, há indícios de relevância significativa do ciclo de vida do cobre nas emissões de óxidos de enxofre, e da operação do canteiro de obras no consumo energético total.

Por meio das discussões de resultados pode-se também concluir que possivelmente a contribuição relativa dos aspectos relacionados aos equipamentos permanentes é bastante significativa, demonstrando a necessidade da inclusão destes nas fronteiras do estudo, inclusive durante a fase de operação da usina, com a manutenção e substituição destes equipamentos.

Na verdade estas conclusões se alinham com as considerações de fronteiras obtidas da literatura a respeito, sumariadas no item 3.4.4 do Capítulo 3. Como pode-se comprovar aqui, parece ser válida para as condições brasileiras a afirmação de que os principais processos de um ICV de hidrelétrica estejam relacionados à formação do reservatório, consumo de materiais para os equipamentos permanentes e operação das máquinas de construção. Ao contrário da recomendação destes estudos no entanto, ou ao menos em segundo plano, os aspectos relacionados ao transporte de insumos e operários e ao consumo próprio de energia pela usina parecem ser de relevância comparativa menor no caso de Itaipu.

Uma conclusão interessante que pode ser obtida na parte das discussões de resultados referente à ordem de grandeza dos valores diz respeito ao *pay-back* energético. Segundo as estimativas realizadas, tem-se que toda a energia consumida no ciclo de vida de Itaipu, para um horizonte de análise de 100 anos pode ser produzida, na forma elétrica, em 93 dias de funcionamento da usina, o que demonstra seu desempenho no que diz respeito à eficiência no uso dos recursos.

Quanto aos aspectos relacionados às diversas etapas de transporte, tanto dos insumos como dentro dos seus ciclos de vida, as Tabelas 6.07 e 6.08 apresentam comparações entre as emissões e consumo de combustível para os diversos tipos de transporte e a

operação das máquinas de construção. Na verdade o que se pode concluir de sua observação é que em relação às emissões e ao consumo de diesel, as operações de transporte no ciclo de vida de Itaipu são pouco significativas em comparação às máquinas de construção. A única exceção parece ser o SO_x, que apresenta um valor bastante elevado para o transporte marítimo. Esta conclusão permite afirmar que em um posterior refino das estimativas deste estudo seria mais interessante focar esforços em melhor definir os tipos e o uso dos equipamentos de construção do que detalhar distâncias de transporte ou mesmo buscar fatores de emissão mais adequados.

Ainda sobre as emissões veiculares, a comparação do total destes aspectos com as emissões veiculares da RMSP permite afirmar que, em termos absolutos, as emissões veiculares de Itaipu, mesmo incluindo as máquinas de construção, são bastante reduzidas em comparação com outras situações às quais o meio atmosférico está sujeito, e provavelmente numa avaliação de impactos ambientais sua contribuição seria bastante reduzida.

A respeito dos resultados deste estudo, a última conclusão que se pode fazer diz respeito à grandeza dos valores do ICV em conjunto, e conseqüentemente da implicação do uso destes resultados em outros estudos de ACV, e para tanto desenvolve-se um item específico, apresentado a seguir.

7.4 Conclusões sobre o uso destes resultados

Fundamentalmente este estudo visa subsidiar executores de ACV onde há consumo de eletricidade da rede brasileira. No entanto, há um outro uso para o qual estes valores podem ser aplicados, embora com diversas restrições: o planejamento energético.

Na verdade atualmente vários países e instituições tem proposto critérios ambientais baseados em ACV para a seleção de alternativas energéticas. Neste sentido, a comparação de resultados entre diferentes tecnologias de geração desempenha importante papel.

Tendo em vista este pano de fundo, e considerando a discussão de resultados realizada no Capítulo 6 sobre a comparação de alguns aspectos ambientais do ciclo de vida de Itaipu com aspectos da geração termelétrica, pode-se concluir que, de

acordo com os dados apresentados, a alternativa hidrelétrica mostra-se muito mais adequada do ponto de vista ambiental, para os parâmetros aqui analisados, do que a geração termelétrica a gás natural.

Esta conclusão no entanto é apenas indicativa, e alerta-se veementemente que não deve ser usada de modo isolado para a tomada de decisões em processos de planejamento estratégico. Na verdade, como já ressaltado em diversos pontos deste trabalho, o que deve ser usado para a tomada de decisões fundamentada em ACV não são os resultados de um ICV, mas sim de uma avaliação de impactos resultante de um estudo de ACV com o objetivo específico de comparação para este fim, e sempre tendo bastante claros quais os juízos de valor aplicados ao estudo.

Neste sentido cabe novamente o importante lembrete de que neste estudo não são considerados impactos ambientais, e sim os aspectos ambientais. Desta forma não são contabilizados neste ICV uma série de impactos derivados da formação do reservatório, que como defendido desde o Capítulo 3 são tidos internacionalmente como os principais impactos da geração hidrelétrica, tal como a perda de habitats, a transformação de ecossistemas, os impactos sócio-econômicos sobre a população direta e indiretamente atingida pela barragem, a alteração da qualidade da água, etc.

Considerando esta observação, faz-se como última conclusão a constatação de que no contexto do planejamento energético, para a avaliação ambiental de empreendimentos hidrelétricos a ACV, ao menos em seu atual estágio de desenvolvimento metodológico, pode servir como orientadora de aspectos e impactos ambientais dos fluxos de matéria e energia, mas é totalmente incapaz de lidar com a subjetividade dos impactos sócio- econômicos- culturais sobre a população, e ecológicos atuantes sobre as espécies e ecossistemas.

7.5 Consolidação das conclusões

Consolidando o apresentado até o momento neste Capítulo, pode-se dizer que de modo resumido as conclusões deste estudo são:

- para que se identifique de modo científico e criterioso os aspectos e processos mais importantes de um ciclo de vida, é imprescindível que após o ICV se realize uma Avaliação de Impactos;

- para que se obtenha um ICV de qualidade é necessário que haja homogeneidade de critério entre as quantificações dos aspectos ambientais dos diferentes processos;
- em um ICV que não foi refinado mediante aplicação de uma Avaliação de Impactos, é mais provável que existam diversos aspectos ambientais de pouco significado;
- as maiores contribuições aos aspectos ambientais do ciclo de vida de uma hidrelétrica estão relacionadas à sua construção;
- os resultados do ICV de uma usina hidrelétrica são fortemente dependentes do período de análise considerado, na verdade da quantidade de energia gerada neste período;
- há fortes indícios de que a usina de Itaipu apresenta um melhor desempenho ambiental de que outras usinas hidrelétricas de menor tamanho, em termos dos parâmetros avaliados neste estudo;
- cada hidrelétrica consiste um caso a parte, e não parece possível estabelecer um modelo paramétrico que descreva seus aspectos ambientais de ciclo de vida com base em parâmetros construtivos ou operacionais sem a condução de um estudo específico;
- é bastante provável que os processos que mais contribuem para os aspectos do ciclo de vida de uma usina hidrelétrica sejam a formação do reservatório, ciclo de vida do aço, ciclo de vida do cimento e operação das máquinas de construção;
- a usina de Itaipu apresenta um excelente tempo de retorno (*pay-back*) energético, segundo as estimativas realizadas;
- os principais consumos de energia de todo o ciclo de vida parecem ocorrer no ciclo de vida do aço e do cimento, na operação das máquinas de construção e na operação dos equipamentos no canteiro de obras;
- os materiais usados nos equipamentos permanentes possuem participação expressiva nos aspectos ambientais, por conta de seu consumo de aço principalmente;
- em relação ao consumo de diesel e às emissões atmosféricas, a operação das máquinas de construção é predominante sobre as etapas de transporte;

- comparadas às emissões veiculares da Região Metropolitana de São Paulo, o total das emissões veiculares do ciclo de vida de Itaipu não parece ser significativo;
- para os parâmetros em questão, tudo indica que a geração hidrelétrica é muito menos impactante do que a geração termelétrica. Cabe lembrar a limitação da ACV enquanto metodologia, que não aborda impactos sobre os meios social, econômico e sobre as alterações dos ecossistemas, e
- A ACV pode auxiliar, mas não realizar sozinha, o apoio à tomada de decisão sobre planejamento energético.

7.6 Recomendações

Com base nas conclusões obtidas, e tendo em vista as hipóteses admitidas no Anexo E, pode-se fazer algumas recomendações para estudos futuros, a saber:

- a) recomendações para refino deste estudo: buscar solucionar as principais limitações citadas no Capítulo 6, principalmente:
- buscar quantificações dos processos mais homogêneas quanto aos aspectos considerados;
 - realizar uma avaliação de impactos para priorização de aspectos e processos com maior grau de confiabilidade;
 - realizar uma estimativa mais precisa da energia gerada nos 100 anos;
 - melhorar a estimativa dos seguintes processos:
 - emissão de gases de efeito estufa pelo reservatório;
 - operação das máquinas de construção;
 - equipamentos permanentes;
 - consumo de óleo lubrificante e de transformador, e
 - produção de gusa em alto- fornos.
 - verificar a necessidade de inclusão ou refino dos seguintes processos:
 - emissão de particulados na obra de Itaipu (movimentação de terra, uso explosivos, operação do canteiro);
 - ciclo de vida do aço;
 - ciclo de vida do cimento;
 - transporte de equipamentos permanentes;
 - fabricação dos equipamentos permanentes;

- consumo de cobre na usina;
- consumo de outros materiais na usina;
- transporte do petróleo brasileiro, e
- uso de produtos químicos na usina.

b) recomendações para obtenção de um ICV de geração elétrica no Brasil com maior representatividade:

- realizar um ICV da geração termelétrica, e incorporar a este ICV com a devida ponderação, e
- realizar outros estudos de ICV de hidrelétricas, ponderando com este o resultado para esta forma de geração.

c) recomendações para estudos de ACV de hidrelétricas:

- considerar como função a geração de eletricidade, sem realizar alocação para os possíveis usos múltiplos do reservatório, salvo motivo que o justifique;
- considerar como unidade funcional a geração de uma unidade de energia, por exemplo o MWh;
- usar como horizonte de análise o período de 100 anos de operação;
- focar as atenções nos processos de:
 - operação das máquinas de construção;
 - uso de materiais pelos equipamentos permanentes, principalmente aço, cobre e óleos, incluindo sua manutenção e reposição;
 - ciclo de vida de insumos principais: aço, cimento, diesel e cobre;
 - transporte de insumos e operários, e
 - uso do solo e emissão de gases de efeito estufa pelo reservatório.

d) recomendações para estudos de ACV em geral:

- buscar, na medida do possível, realizar trabalhos de coleta de dados especificamente para o estudo (dados primários), ou ao menos de uma mesma fonte, buscando sempre a homogeneidade de critérios;

- realizar, ainda que de modo simplificado, uma avaliação de impactos, de modo a permitir o estabelecimento de um critério que oriente a seleção de aspectos e processos mais significativos;
- ao consolidar os ICVs parciais de insumos, atentar para a “propagação” de aspectos de pouca relevância ambiental, evitando o excesso de aspectos ao final do trabalho;

Uma recomendação que se pode realizar ao final deste trabalho diz respeito ao modo de condução de um estudo de ICV. Devido às dificuldades encontradas no transcurso deste estudo, recomenda-se que futuros estudos de ICV sejam conduzidos por equipes multi-disciplinares, com divisão de tarefas específicas de levantamento de dados mas com periódicas reuniões onde participariam todos os envolvidos. Desta maneira considera-se que poderá haver maior foco nos diversos processos, para que os dados específicos sejam levantados em menor tempo. Ademais, simultaneamente será possível, pelo comprometimento de um maior número de pessoas, uma profícua oportunidade de discussão a respeito das tomadas de decisão sobre fronteiras, representatividade de processos e qualidade de dados, o que se imagina otimizará os resultados obtidos.

7.7 Comentários sobre o atendimento dos objetivos propostos

Pode-se afirmar, a título de conclusão geral deste trabalho, que os objetivos inicialmente propostos foram atendidos.

A disponibilização do ICV de Itaipu, apresentado integralmente na Tabela 5.03 e agregado na Tabela 6.02, atende ao principal objetivo específico proposto, de “gerar e disponibilizar um inventário de ciclo de vida representativo da geração de eletricidade no Brasil”.

As considerações sobre a real representatividade de um ICV de Itaipu para a geração elétrica nacional são discutidas no Capítulo 4- Metodologia utilizada, mas de modo bastante conciso o que se pode afirmar é que em todos os casos internacionais encontrados na literatura as bases de dados dos sistemas elétricos é sempre inicialmente proposta como uma extrapolação da instalação de maior contribuição, sendo que em alguns, poucos, casos, realizam-se estudos posteriores que adicionam

novas instalações. Desta forma, tendo em vista a experiência internacional de execução de ICVs de sistemas elétricos e dadas as limitações de recursos e tempo de uma dissertação de mestrado, a escolha de Itaipu como sistema de produto para levantamento do ICV é, sem dúvida, a mais adequada.

Além desta aspecto, há que se considerar que, em comparação aos estudos internacionais citados, o presente ICV apresenta uma melhoria de qualidade dos dados, ao utilizar nos ciclos de vida dos insumos quantificações realizadas em sua maioria à época de construção da usina, garantindo assim maior representatividade dos processos.

No entanto, deve-se salientar mais uma vez, que os resultados obtidos são válidos apenas no âmbito das diversas hipóteses aqui utilizadas, que constituíram no momento e nas condições da realização deste estudo as melhores aproximações possíveis. Embora realizado com grande esforço, o ICV aqui apresentado pode e deve ser melhorado ao longo do tempo, tendo em vista principalmente as recomendações anteriores, de modo a convergir a um modelo cada vez mais próximo à realidade da geração elétrica brasileira.

Sobre os objetivos de “identificar os aspectos ambientais mais significativos no ciclo de vida de uma usina hidrelétrica no Brasil” e “apontar quais os processos envolvidos no ciclo de vida de uma hidrelétrica que originam os aspectos ambientais mais significativos”, pode-se dizer que estes foram realizados na medida do possível, dada a limitação da ausência de uma etapa de avaliação de impactos ambientais.

Em vista do observado nos estudos similares encontrados na literatura, há bastante coerência nos resultados obtidos, tanto no próprio ICV como na identificação dos aspectos e processos mais relevantes, mesmo considerando estas limitações.

Em último lugar, sobre o objetivo de “contribuir ao desenvolvimento do conhecimento nacional sobre a execução de estudos de ICV para bases de dados”, tem-se que o presente trabalho apresenta importantes colaborações a este campo de pesquisas.

Considera-se que não apenas a disponibilização do ICV de Itaipu, mas inclusive, e talvez principalmente, as diversas considerações realizadas ao longo de todo este documento colaboram inequivocamente à consecução do propósito geral deste

trabalho de “contribuir ao desenvolvimento das condições necessárias à realização de estudos de ACV no país”.

Portanto, a realização do projeto de desenvolvimento das bases de dados brasileiras para ICV relativas à geração, transmissão e distribuição de eletricidade, da qual o presente documento é uma das três dissertações de mestrado constituintes, apresenta-se como de grande relevância no cenário da ACV no Brasil.

A transparência advinda deste tipo de documento busca não apenas fornecer dados com o necessário conhecimento das hipóteses utilizadas, mas principalmente, busca exemplificar metodologias de execução de ICV. O intuito desta iniciativa encontra-se em subsidiar futuros executores de estudos desta natureza no estabelecimento de suas próprias definições e hipóteses, com o objetivo de reduzir as dificuldades metodológicas encontradas atualmente, e que em grande parte dificultam ou ao menos aumentam a inerente complexidade dos atuais trabalhos desenvolvidos nesta área do conhecimento.

Desta forma pretende-se mostrar que na compilação de cálculos, hipóteses e descrição de metodologias de ICV encontra-se talvez a grande contribuição dos trabalhos de mestrado componentes deste projeto. Estes são, sem dúvida, o primeiro passo de uma iniciativa a longo prazo, que se bem conduzida pode levar ao desenvolvimento de condições para que no futuro seja possível realizar no Brasil estudos de ACV de qualidade, servindo assim aos seus propósitos de auxiliar tomadas de decisão na busca de padrões de produção e consumo mais ambientalmente sustentáveis e socialmente justos.

8. Referências bibliográficas

- ABBASI, S.A. et al., **The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources**, Applied Energy (65), 2001.
- ABCP- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, **Guia básico de utilização do cimento Portland**, Boletim técnico n.30, ABCP, São Paulo, 1994.
- ABM- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, **Prática da fabricação de aço em fornos SM básicos**, ABM, São Paulo, 1962.
- _____, **Siderurgia brasileira a carvão vegetal**, ABM, São Paulo, 1975.
- _____, **Siderurgia brasileira e matérias-primas**, ABM, São Paulo, 1979.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Sistemas de gestão ambiental – Especificações e diretrizes para uso - NBR ISO 14.001**, ABNT, Rio de Janeiro, 1996.
- _____, **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura - NBR ISO 14.040**, ABNT, Rio de Janeiro, 2001.
- ABRANTES, R., **Caracterização preliminar das emissões de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e aldeídos de veículos do ciclo diesel**, Dissertação (Mestrado), Faculdade de Saúde Pública/ Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- ABREU, S.F., **Recursos minerais do Brasil**, 2 v., Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1973.
- AEA TECHNOLOGY, **Site corporativo**, disponível em www.aeat.co.uk, acessado em 21 de Mar. de 2003.
- ALONSO, C., **Comunicação pessoal- CETESB**, diversas datas, 2003.
- ALVARES JR., O. M., LINKE, R.R.A., **Metodologia simplificada de cálculo das emissões de gases de efeito estufa da frota de veículos do Brasil**, relatório CETESB, s/d, disponível no site www.ambiente.sp.gov.br/proclima/proclima.htm, acessado em 19 de Mar. de 2003.
- ANASTÁCIO, M., **Comunicação pessoal- Camargo Corrêa**, 18 de Mar. de 2003.
- ANDERY, M.A. et al., **Para compreender a ciência- uma perspectiva histórica**, EDUC, São Paulo, 1988.

- ANDRIOLO, F.A., **Construções de concreto**, PINI, São Paulo, 1984.
- _____, **Comunicação pessoal**, em 08 de Dez. de 2002.
- _____, **Comunicação pessoal**, em 06 de Mar. de 2003.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Site corporativo**, disponível em www.aneel.gov.br, acessado em 18 de Dez. de 2001.
- _____, **Site corporativo**, disponível em www.aneel.gov.br, acessado em 18 de Dez. de 2002.
- ARAÚJO, L.A., **Siderurgia**, FTD, São Paulo, 1967.
- _____, **Manual de siderurgia**, 2 v., Ed. Arte e Ciência, São Paulo, 1997.
- ATLAS COPCO, **Site corporativo**, disponível em www.atlascopco.com, acessado em 13 de Mar. de 2003.
- BADASCHIA, C., **Curso de siderurgia**, Ind. Elétrica Brow- Boveri, Osasco, 1974.
- BAER, W., **Siderurgia e desenvolvimento brasileiro**, Ed. Zahar, Rio de Janeiro, 1970.
- BAISNÉE, P. **Life-Cycle Assessment of energy systems, and energy in Life-Cycle Assessment - Some methodological problems**, *In: Expert Workshop on Life-Cycle Analysis of Energy Systems, Methods and Experiences*, OECD, Paris, 1992.
- BENJAMIN, A. K., **Desenvolvimento de modelo para avaliação de softwares de apoio à análise de ciclo de vida**, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- BERMANN, C., **Energia no Brasil: Para quê? Para quem?- Crise e alternativas para um país sustentável**, Ed. Livraria da Física/ FASE, São Paulo, 2002.
- BIANCHINI JR., I., **The degradation process of organic matter in reservoirs**, *In: ROSA, L.P.; SANTOS, M.A. (org.)*, Hydropower plants and greenhouse gas emissions, COPPE, Rio de Janeiro, 1997.
- BOAS, E.A., **A indústria siderúrgica na América Latina- Sua origem e evolução**, s/e, São Paulo, 1966.
- BÖRNKE, V., **Comunicação pessoal- O&K Mining GmbH**, Março 2003.
- BRAAM, J., **Energy, transport and waste models**, *The Int. J. of Life-Cycle Assessment*, 6 (3), 2001.
- BADASCHIA, C., **Curso de siderurgia**, Ind. Elétrica Brow- Boveri, Osasco, 1974.

- BRAGA, J.A; SONADA, A., **Aspectos sobre as construções de concreto - Aproveitamento hidrelétrico de Itaipu**, Relatório, IBRACON, São Paulo, 1983.
- BRAILE, P.M., CAVALCANTI, J.E.W.A., **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**, CETESB, São Paulo, 1993.
- BRANCO, S.M., **Ecosistêmica. Uma abordagem integrada dos problemas do Meio Ambiente**, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1989.
- BRÄNNSTRÖM-NORBERG, B.M. et al. **Life Cycle Assessment for Vattenfall's Electricity Generation - Summary Report**, Vattenfall AB, Estocolmo, 1996.
- BRASIL. MME- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. DNPM- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL, **Perfil analítico do cimento**, Boletim n.30, DNPM, Rio de Janeiro, 1974.
- _____. MME- Ministério das Minas e Energia, **Referencial para orçamentação dos programas sócio- ambientais- Usinas Hidrelétricas**, 2v. MME/ Eletrobrás/COMASE, Rio de Janeiro, 1986.
- _____. MME- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, **Balanco energético nacional – 2001, ano base 2000**, MME, Brasília, 2001.
- _____. MCT- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, **Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros**, Relatório de referência do “Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa”, MCT, Brasília, 2002.
- _____. MRE- MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES, **Site corporativo**, disponível em www.mre.gov.br, acessado em 15 de Jun. de 2003.
- _____. MME- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, **Balanco energético nacional – 2003, ano base 2002**, MME, Brasília, 2003.
- BROWN, J.G, **Hydro-electric engineering practice**, 3 v., Blackie & Son, Londres, 1958.
- CARDOSO, F.F. et al, **A fabricação do aço**, publicação técnica PT-01, Escola Politécnica da USP/ FDTE/ COSIPA, São Paulo, 1988a.
- _____. **O mercado do aço**, publicação técnica PT-02, Escola Politécnica da USP/ FDTE/ COSIPA, São Paulo, 1988b.

- CARRINGTON, G., **A study of the Lake Chelan Hydroelectric Project based on Life-Cycle Stressor-Effects Assessment**, SCS - Scientific Certification Systems, Lake Cheelan, 2000.
- CARVALHO, C.E., **A Análise de ciclo de vida e os custos completos no planejamento energético**, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- CARVALHO, J., **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil- Estudo de caso: Comparação ente cimento Portland com adição de resíduos**, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- CATERPILLAR, **Site corporativo**, disponível em www.caterpillar.com, acessado em 14 de Mar. de 2003.
- CAVALCANTI, J.C., **Itaipu, o desafio**, Revista Energia elétrica, Ano 2, n.18, Novo Grupo Editora Técnica, São Paulo, 1979.
- CBDB- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, **Site corporativo**, disponível em www.cbdb.org.br, acessado em 18 de Abr. de 2002.
- CESP- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO, **Usinas: Canoas I – Canoas II. Relatório de Impacto ambiental – RIMA**, CESP, São Paulo, 1990.
- CETESB- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, **Águas residuárias de complexos siderúrgicos- Caracterização, origem e sistemas de tratamento**, CETESB, São Paulo, 1978.
- _____, **Nota técnica sobre tecnologia de controle- Indústria do cimento**, CETESB, São Paulo, 1992.
- _____, **Relatório de qualidade do ar do Estado de São Paulo- 2001**, CETESB, São Paulo, 2002.
- CHRISTIANSEN, K., **Life Cycle Assessment in a historical perspective**, *In*: Workshp internacional sobre análise do ciclo de vida, ABNT, Rio de Janeiro, 1996.
- CIODARO Fº, A., ANDRADE, J.O.C. (coord.), **Preparação de carga para alto-fornos**, ABM, São Paulo, 1979.

- COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO, **Site corporativo**, disponível em www.crm.gov.br, acessado em 31 de Mar. de 2003.
- CONSOLI, F. et al., **Guidelines fo Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"**, SETAC, Pensacola, 1993.
- CREAGER, W.P.; JUSTIN, J.D., **Hydroelectric handbook**, Jonh Wiley, Nova Iorque, 1950.
- CRUZ, P.T., **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**, Oficina de Textos, São Paulo, 1996.
- CUNHA, G.S., **Comunicação pessoal- Voith Siemens**, em 10 de Set.0. de 2002.
- CURRAN, M.A. (org.), **Environmental Life Cycle Assessment**, McGraw Hill, Nova Iorque, 1996.
- _____, **Summary of Feedback on Issues**. *In*: International Workshop on electricity data for life cycle invenmtories, Sylvatica, Cincinnati. 2001. Disponível em: www.sylvatica.com, acessado em 18 de Jan. de 2002.
- DALMI, L., **Comunicação pessoal – Itaipu Binacional**, em 02 de Dez. de 2002.
- DUARTE, U., **Efeitos de reservatórios sobre o meio ambiente**, Notas de aula da disciplina Geologia Ambiental, Instituto de Geociências/USP, São Paulo, 2000.
- DUCHEMIN, E., **Hydroélectricité et gaz à effect de serre**, Vertigo, v.2, n.1, 2001.
- EDIECAST, **Site corporativo**, disponível em www.ediecast.com, acessado em 13 de Mar. de 2003.
- ELETROBRÁS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, **Relatório anual 1977**, ELETROBRAS, Rio de Janeiro, 1978.
- _____, **Relatório anual 1982**, ELETROBRAS, Rio de Janeiro, 1983.
- _____, **Manual de estudos de efeitos ambientais dos sistemas elétricos**, ELETROBRÁS, Rio de Janeiro, 1986.
- _____, **Site corporativo**, disponível em www.eletronbras.gov.br, acessado em 18 de dez. 2001.
- ESTADOS UNIDOS. EPA- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, **Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42)**, 2ª edição, 2 vol., EPA, Michigan, 1973.

- _____. **Supplement n.3 to Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42)**, EPA, Michigan, 1974.
- _____. **Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42)- Vol.1: Mobile Sources**, 4ª edição, EPA, Michigan, 1985a.
- _____. **Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42)- Vol. 2: Fixed point and area sources**, 4ª edição, EPA, Michigan, 1985b.
- _____. **Exhaust Emission Factors for Nonroad Engine Modeling-Compression-Ignition**, EPA, Michigan, 1998.
- _____. **Report on the international workshop on electricity data for life cycle inventories**, EPA, Cincinnati, 2001, disponível no site www.sylvatica.com, acessado em 12 de Mar. de 2003.
- ESPAÑA. Dirección general de medio ambiente. MOPU- Ministerio de obras publicas y urbanismo, **Grandes presas**, MOPU, Madrid, 1989.
- EUROPEAN COMMISSION, **ExternE - Externalities of energy. Vol. 6: Wind and Hydro**, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburgo, 1995.
- EUROPEAN COMMISSION, **The national implementation of the ExternE Project: Accounting framework of the austrian case study**, European Commission DG XII, Luxemburgo, 1997.
- EUROPEAN COMMISSION, **ExternE - Externalities of energy**, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburgo, 1999.
- EXXON MOBIL CORPORATION, **Site corporativo**, disponível em www.esso.com.br, acessado em 04 de Abr. de 2003.
- FABRO, G; LIMA, A.L., **Comunicação pessoal- Itaipu Binacional**, em 05 de Set. de 2002.
- FAVA, J. et al., **A Technical Framework for Life-Cycle Assessment**, SETAC, Washington, 1991.
- FEARNSIDE, P. M., **Hydroelectric dams in the brazilian amazon as sources of “greenhouse” gases**, Environmental Conservation 22(1), 1995.
- _____. **Greenhouse-gas emissions from Amazonian hydroelectric reservoirs: the example of Brazil’s Tucuruí dam as compared to fossil fuel alternatives**, Environmental Conservation, 24(1), 1997.

- _____, **Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí dam) and the energy policy implications**, *Water, air and soil pollution*, v.133, 2002.
- FEEMA- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE, **Relatório de impacto no meio ambiente- Indústria siderúrgica**, 4 vol., FEEMA, Rio de Janeiro, 1977.
- FERNANDES, H.C., LANÇAS, K.P., **Determinação dos níveis de compactação do solo causados pelo tráfego de um “forwarder” em um latossolo roxo da região de Botucatu/SP**, disponível em www.fca.unesp.br, acessado em 08 de Abr. de 2003.
- FERREIRA, O.C., **O futuro do carvão vegetal na siderurgia**, disponível em <http://ecen.com>, acessado em 17 de Mai. de 2003.
- GAGNON, L., BÉLANGER, C., UCHYAMA, Y., **Life-Cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001**, *Energy Police*, v.30, 2002.
- GAIOTO, N., **Métodos construtivos de barragens de terra e de enrocamento**, apostila do Dept. Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- GELEILETE, S.J.M., **Reciclagem de resíduos nas siderurgias**, Monografia, PECE- Programa de Educação Continuada/ EPUSP- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- GOLDEMBERG, J., **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**, EDUSP, São Paulo, 1998.
- GOMES, E.A.T., **Bacterial decomposition in aquatic system**, *In: ROSA, L.P., SANTOS, M.A. (org.), Hydropower plants and greenhouse gas emissions*, COPPE, Rio de Janeiro, 1997.
- GUATARI, F., **As três ecologias**, Ed. Papyrus, São Paulo, 2000.
- HERCOVIC, J., **Elaboração do aço: fusão e refino**, ABM, São Paulo, 1976.
- HIGA, O.P., **Curso sobre poluição em indústria siderúrgica- Fundamentos de poluição hídrica**, SIDERBRÁS, Nova Friburgo, 1982.
- IBS- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, **Anuário estatístico da indústria siderúrgica 1982**, IBS, São Paulo, 1983.

- ____ ., **Ações de proteção ambiental da indústria siderúrgica brasileira**, Rio de Janeiro, 1990.
- ____ ., **Balço social da siderurgia 2002**, IBS, Rio de Janeiro, 2002.
- IEA- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, **Benign energy? The environmental implications of renewables**, OECD/IEA, Paris, 1998. disponível em www.iea.org, acessado em 05 de Set. de 2001.
- ____ ., **Implementing Agreement for Hidropower Technologies and Programmes**, OECD/IEA, Paris, 2000.
- IEE- INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA/ UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, **O carvão vegetal no Brasil**, disponível em www.iee.usp.br, consultado em de 2003.
- INGERSOLL-RAND, **Site corporativo**, disponível em www.igersoll-rand.com, acessado em 13 de Mar. de 2003.
- IPCC- INTERGOVERNMENTAL PANNEL ON CLIMATE CHANGE, **Site corporativo**, disponível em www.ipcc.ch, acessado em 12 de Ago. de 2003.
- IPT- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, **Manual de recomendações para um programa de redução do consumo de energia na indústria de cimento**, 3v., IPT, São Paulo, 1978.
- ISO- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **Environmental management- Life Cycle assessment- Principles and framework- ISO 14.040**, ISO, Genebra, 1997.
- ____ ., **Environmental management – Life Cycle Assessment – Goal and scope definition and inventory analysis- ISO 14.041**, ISO, Genebra, 1998.
- ____ ., **Environmental management – Life Cycle Assessment – Life cycle impact assessment- ISO 14.042**, ISO, Genebra, 2000a.
- ____ ., **Environmental management – Life Cycle Assessment – Life cycle interpretation -ISO 14.043**, ISO, Genebra, 2000b.
- ____ ., **Environmental management - Life Cycle Assessment - Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis- ISO/ TR 14.049**, ISO, Genebra, 2000c.
- ____ ., **Environmental management - Life Cycle Assessment - Data documentation format- ISO/ TS 14.048**, ISO, Genebra, 2002.

- ____ ., **Site corporativo**, disponível em www.iso.org, acessado em 10 de Novembro de 2003.
- ____ ., **Environmental management- Life Cycle Impact Assessment- Examples of application of ISO 14.042- ISO/ TR 14.047**, ISO, Genebra, 2003b.
- ITAIPU BINACIONAL, **Relatório anual – 1976**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1977.
- ____ ., **Relatório Anual – 1977**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1978.
- ____ ., **Relatório Anual – 1978**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1979.
- ____ ., **Relatório Anual – 1979**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1980.
- ____ ., **Relatório Anual – 1980**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1981a.
- ____ ., **Os primeiros dez anos- 1974-1984**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1981b;
- ____ ., **Projeto Itaipu**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1981c.
- ____ ., **Relatório Anual – 1981**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1982.
- ____ ., **Relatório Anual – 1982**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1983.
- ____ ., **Relatório Anual – 1983**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1984.
- ____ ., **Relatório Anual – 1984**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1985.
- ____ ., **Relatório Anual – 1986**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1987.
- ____ ., **Aspectos técnicos do empreendimento Itaipu**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1989.
- ____ ., **Itaipu - Hydroelectric project - Engineering features**, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 1994.
- ____ ., **Site corporativo**, disponível em www.itaipu.gov.br, acessado em 02 de Mai. de 2002.
- ____ ., **Site corporativo**, disponível em www.itaipu.gov.br, acessado em 03 de Mar. de 2003.
- JENSEN, A. A. et al., **Life-Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources**, Report to the European Environmental Agency, TEKNIK Energy and Environment, Søborg, 1997.
- JENSEN, R.B., **Advanced dam engineering- for design, construction, and rehabilitation**, Ed. Van Nostrand Reinhold, Nova Iorque, 1988.

- JOHN, V., **Comunicação pessoal- Escola Politécnica/ USP**, em 11 de Mar. de 2003.
- JORNAL DE ITAIPU, Itaipu Binacional, Ano XIII, n.121, Fev. 2000;
- _____. , Itaipu Binacional, Ano XV, n. 129, Dez. 2001;
- JUVILLAR, J.B. (cord.), **Energia nos processos siderúrgicos**, ABM, São Paulo, 1980.
- KLINGENBERG, G., **Construction des grandes stations centrales électriques**, Librairie polytechnique, Paris, 1923.
- KREWITT, W., **Feedback on background paper**, *In: International Workshop on Electricity Data for Life Cycle Inventories*, Sylvatica, Cincinnati, 2001. Disponível em www.sylvatica.com, acessado em 18 de Jan. de 2002.
- KULAY, L.A., **Desenvolvimento de modelo de análise de ciclo de vida adequado às condições brasileiras – Aplicação ao caso do superfosfato simples**, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica/ USP, São Paulo, 2000.
- LEINZ, V., LEONARDOS, O. H., **Glossário geológico**, Cia. Editora Nacional, São Paulo, 1982.
- LICCO, E.A. et alli, **Guia industrial de siderurgia**, CETESB, São Paulo, 1977.
- LIMA, I.B.T.; NOVO, E.M.M.L., **Carbon flows in the Tucuruí reservoir**, *in* ROSA, L.P. (org.), *Dams and Climate Change*, COPPE, Rio de Janeiro, 1999.
- LINKE, R.R.A.; COSTA, W., **Comunicação pessoal- CETESB**, em 12 de Fev. de 2003.
- LUCON, O. S., **Projeto “Gás Natural”- Estudo dos efeitos ambientais da penetração do gás natural na matriz energética do Estado de São Paulo**, 3v., CETESB, São Paulo, 2001.
- MAGNOLI, D., ARAÚJO, R., **A nova geografia- Estudos de geografia do Brasil**, Ed. Moderna, São Paulo, 1992.
- MAGRINI, A., **Samambaia -H: Uma proposta metodológica para a avaliação de impacto ambiental de hidrelétricas**, *In: Encontro brasileiro de ciências ambientais*, UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.
- MARTINS, A. et al, **The national implementation of the ExterneE Project: Portugal**, CEEETA, Lisboa, 1998

- MARTINS, O.S., **Análises de ciclo de vida como contribuição à gestão ambiental de processos produtivos e empreendimentos energéticos**, Dissertação (Mestrado), PIPGE- Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia/ Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- MASSAD, F., **Barragens de terra e enrocamento**, apostila do curso PEF-510: Obras de Terra, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2001.
- MASUDA, H. (coord.), **Carvão e coque aplicados à metalurgia**, ABM, São Paulo, 1980.
- MATVIENKO, B. et al, **Gas release from a reservoir in the filling stage**, *In*: ROSA, L.P. (org.), Dams and Climate Change, COPPE, Rio de Janeiro, 1999;
- MATVIENKO, B.; TUNDISI, J.G., **Biogenic gases and decay of organic matter**, *In*: ROSA, L.P., SANTOS, M.A., Hydropower plants and greenhouse gas emissions, COPPE, Rio de Janeiro, 1997.
- MBR- MINERAÇÕES REUNIDAS BRASILEIRAS S.A., **Site corporativo**, disponível em www.mbr.com.br, acessado em 05 de Junho de 2003.
- MEADOWS, D.H. et al, **Limites do crescimento**, Ed. Perspectiva, São Paulo, 1972.
- MESCOLIN, H.C., **Comunicação pessoal- Itaipu Binacional**, em 21 de Out. de 2002.
- MEYERS, H., JENNINGS, R.F., Charcoal ironmaking- A technical and economic review of brasilian experience, UNIDO, Paris, 1979.
- MOSONYI, E., **Water power development**, Akadémiai Kiadó, Budapeste, 1963.
- NAKAZATO, D., **Alguns aspectos que influenciam a concepção e o projeto de desvio de rios**, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica/ Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.
- NAEI- NATIONAL ATMOSPHERIC EMISSIONS INVENTORY, **Site corporativo**, disponível em www.naei.org.uk, acessado em Março de 2001.
- _____, **Site corporativo**, disponível em www.naei.org.uk, acessado em 07 de Junho de 2003.
- NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS, **External Costs of Electricity Generatiuon in Greece**, Laboratory of Industrial and Energy Economics, Atenas, 1997.

- NYNAS DO BRASIL LTDA., **Manual de óleo para transformador**, NYNAS, São Paulo, 1998.
- OECD- ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT, **Highlights: Synthesis of the issue**, *In: Expert Workshop on Life-Cycle Analysis of Energy Systems, Methods and Experiences*, OECD, Paris, 1992.
- ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, **Site corporativo**, disponível em www.nos.org.br, acessado em 24 de Out. 2001.
- ORNL - OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, **Estimating externalities of the Hydro Fuel Cycles**, ORNL, Oak Ridge, 1994.
- OVERCASH, M., **Preparation input for Workshop on Electricity Data for Life Cycle Inventories**, *In: International Workshop on Electricity Data for Life Cycle Inventories*, Sylvatica, Cincinnati, 2001. Disponível em www.sylvatica.com, acessado em 18 de Jan. 2002.
- PEREIRA, D, et al, **Geografia- Ciência do espaço: O espaço brasileiro**, Ed. Atual, São Paulo, 1993.
- PEREIRA, F.A. (org.), **Atlas geográfico**, Ed. Melhoramentos, São Paulo, 1985.
- PERES, L., **O gesso- produção e utilização na construção civil**, Ed. Bagaço, Recife, 2001.
- PETROBRAS- PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., **Site corporativo**, disponível em www.petrobras.com.br, acessado em 04 de Abr. de 2003.
- POLI, M.C., **Comunicação pessoal- CETESB**, 16 de Mai. de 2003.
- PONTING, C., **Uma história verde do mundo**, Ed. Nobel, São Paulo, 1995.
- PRÉ CONSULTANTS, **SIMAPRO versão 5.1**, Pré Consultants, Amsterdam, 2003. Disponível em www.pre.nl, acessado em 06 de Junho de 2003.
- PRICE, T.; PROBERT, D., **Harnessing hydropower: A practical guide**, Applied Energy, 57(2/3), 1997.
- QUATRO RODAS, **Guia Brasil 1986**, Ed. Abril, São Paulo, 1986;
- QUATRO RODAS, **Guia Rodoviário 1985**, Ed. Abril, São Paulo, 1985;
- QUINTAES, I., **Comunicação pessoal- Atlas Copco**, em 17 de Mar. de 2003;
- RAABE, I.J., **Hydro power**, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1985.

- RASHAD, S.M., ISMAIL, M.A., **Environmental-impact assessment of hydro-power in Egypt**, Applied Energy (65), 2000.
- REINO UNIDO. DEPARTMENT OF ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS, **National Atmospheric Emission Inventory- UK Emission Factor Database**, disponível em www.naei.org.uk/emissions/index.php, acessado em 20 de Mar. de 2003.
- REIS, L.B.; SILVEIRA, S. (org.), **Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável**, EDUSP, São Paulo, 2000.
- REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, **Itaipu binacional: A obra**, Ano 6, n.66, Ed. Divulgação de Publicações, São Paulo, pp.79-175, 1977.
- _____, **Itaipu binacional: Efeitos ecológicos decorrentes do projeto/ Descrição geral do projeto e suas modificações principais/ Geotecnia, escavações e aterros/ Construções de concreto/ Problemas de montagem**, Ano 9, n.98, São Paulo, Ed. Divulgação de Publicações, N.98, Março/1979, pp.36-154, 1979.
- _____, **Itaipu: Obras civis: Ensecadeiras de desvio, esgotamento do recinto ensecado, escavações na área do leito do rio/ Concretagem: Equipamentos especiais para lançamento e transporte de concreto/ Produção: A obra atinge pico de concretagem de 15.000 m³ diários**, Ano 9, n.112, Ed. Divulgação de Publicações, São Paulo, pp.28-68, 1980.
- _____, **Itaipu: entrevista: Faltam 623 dias para o total enchimento do reservatório construção: Aspectos principais de construção verificados em 1980/ Cumprir cronograma é meta dos consórcios- construtores**, Ano 11, n. 128, Ed. Divulgação de Publicações, São Paulo, pp.108- 135, 1981.
- _____, **Guia de equipamentos**, Ano 11, n.135, Abril 1982.
- _____, **Guia de equipamentos**, Ano 13, n.144, Janeiro 1983.
- RIBEIRO, F.M., **Aplicação da análise de ciclo de vida em sistemas energéticos- Estado da arte em estudos de inventário de ciclo de vida de hidrelétricas**, Monografia (Especialização), PECE- Programa de Educação Continuada em Engenharia- Escola Politécnica/ Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

- RIBEIRO, F.M., MARTINS, A.I.S., **Análise do ciclo de vida da cerveja**, trabalho de conclusão AQ-012, PECE- Programa de Educação Continuada em Engenharia- Escola Politécnica/ Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- RIBEIRO, F.M., SILVA, G.A., **Enfoque sobre produto- Uma necessária mudança de paradigma para a busca do desenvolvimento sustentável**, Global Conference- Building a sustainable world, Anais, IUAPPA - International Union of Air Pollution Prevention and Environmental Protection Associations, São Paulo, 2002a.
- _____, **Avaliação ambiental de sistemas energéticos: Reflexões sobre uma nova abordagem, baseada na metodologia da Análise de Ciclo de Vida**, *In: IX CBE- Congresso Brasileiro de Energia, SBPE*, Rio de Janeiro, 2002b.
- RMIT- ROYAL MELBOURNE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, **Australian LCA inventory data project**, disponível em www.cfd.rmit.edu.au, Acessado em diversos dias de Março de 2003.
- ROISENBLATT, I., **Comunicação pessoal- Philips**, em 12 de Fev. de 2003.
- ROSA, L.P. et al, **Measurements of greenhouse gas emissions in Samuel, Tucuruí and Balbina dams- Brazil**, *In ROSA, L.P., SANTOS, M. A. (org.)*, Hydropower plants and greenhouse gas emissions, COPPE, Rio de Janeiro, 1997.
- ROSA, L.P.; SANTOS, M.A., **Hydroelectric dams and greenhouse gas emission: an introduction to the problem**, *In: ROSA, L.P. (org.)*, Dams and Climate Change, COPPE, Rio de Janeiro, 1999.
- ROSA, L.P.; SCHAEFFER, R., **Global warming potentials- The case of emissions from dams**, *Energy Policy*, 23(2), 1995.
- SAGAN, C., **Os dragões do Éden**, Ed. Francisco Alves, São Paulo, 1980.
- SÁNCHEZ, L.E., **Desengenharia: O passivo ambiental na desativação de empreendimentos industriais**, EDUSP, São Paulo, 2001.
- SANTOS, M.A., **Inventário de emissão de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas**, Tese (Doutorado), PPE- Programa de Planejamento Energético- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- SANTOS, M.R., **Comunicação pessoal – Ex funcionário Itaipu Binacional**, 16 de Nov. de 2001.

- SCANIA AB, **Site corporativo**, disponível em www.scania.com, acessado em 16 de Mar. de 2003.
- SCHREIBER, G.P., **Usinas Hidrelétricas**, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1978.
- SETTERWALL, C., **Input to the Workshop**, *In: International Workshop on Electricity Data for Life Cycle Inventories*, Sylvatica, Cincinnati, 2001. Disponível em www.sylvatica.com, acesso em 18 de jan. 2002.
- SILVA. G.A, **Análise de Ciclo de Vida de Processos Industriais**, apostila do curso AQ-012- Análise de Ciclo de Vida de Processos Industriais, PECE- Programa de Educação Continuada em Engenharia- Escola Politécnica/ Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- SNIC- SINDICATO NACIONAL DAS INDUSTRIAS DE CIMENTO, **Relatório anual 1976/ 1977**, SNIC, Rio de Janeiro, 1978.
- ____ ., **Relatório anual 2000**, SNIC, Rio de Janeiro, 2001;
- SOBRINHO, P.J.N., TENÓRIO, J.A.S., **Geração de resíduos durante o processo de fabricação de ferro e aço**, 55º Congresso Anual da ABM, ABM, Rio de Janeiro, 2000.
- SØRENSEN, B., **What is Life-Cycle Analysis?**, *In: Expert Workshop on Life-Cycle Analysis of Energy Systems, Methods and Experiences*, Proceedings, OECD/ IEA, Paris, 1992.
- SOUZA, Z.; FUCHS, R.D.; SANTOS, A.H.M., **Centrais hidro e termelétricas**, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1983.
- SWEDISH ENVIRONMENTAL MANEGEMENT COUNCIL, **Certified environmental product declaration (EPD)- Hydropower electricity from the Lule river**, Swedish Environmental Manegement Council, Estocolmo, 1999.
- ____ ., **Summary of Vattenfall AB's Certified environmental product declaration (EPD) of electricity from the river Lule alv**, Swedish Environmental Manegement Council, Estocolmo, 2002a.
- ____ ., **Summary of Vattenfall AB's Certified environmental product declaration (EPD) of electricity from the river Ume alv**, Swedish Environmental Manegement Council, Estocolmo, 2002b.

- TABORIANSKI, V.M., **Avaliação da contribuição das tipologias de aquecimento de água residencial para a variação do estoque de gases de efeito estufa na atmosfera**, dissertação (Mestrado), Escola Politécnica/ Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- TEREX, **Site corporativo**, disponível em www.terex.com, acessado em 03 de Março de 2003.
- THEMAG, **Usina hidrelétrica de Itaipu- Infra-estrutura para construção da obra**, THEMAG, São Paulo, 1982.
- _____, **Estudo de impacto ambiental da Usina Hidrelétrica de Peixe- Vol. 5: Avaliação de Impactos**, THEMAG, São Paulo, 2001.
- THOMAS, H.H., **The engineering of large dams**, John Wiley, Londres, 1976.
- TILLMAN, A.M.; BAUMANN, H., **General Description of Life Cycle Assessment Methodology**, Chalmers University of Technology, Estocolmo, 1995.
- TRACTEBEL ENERGIA, **Site corporativo**, disponível em www.tractebelenergia.com.br, acessado em 31 de Mar. de 2003.
- UEHARA, K., **Comunicação pessoal- Escola Politécnica/ USP**, 20 de Mar. de 2002.
- UNEP- UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME, **Energy: Facts and figures**, Industry and Environment, v.23, n.3, Paris, 2000.
- UNICON, **Planejamento executivo- Central de armação**, UNICON, Foz do Iguaçu, 1978a.
- _____, **Planejamento executivo- Central de carpintaria**, UNICON, Foz do Iguaçu, 1978b.
- VATTENFALL, **Vattenfall's Life Cycle Studies of Electricity**, VATTENFALL AB, Estocolmo 1999.
- VELASCO, P., **The mineral industries of Paraguay and Uruguay- 2000**, US Geological Survey Minerals Yearbook 2000, disponível em <http://minerals.er.usgov.gov/minerals/pubs/country/2000/9522000.pdf>, acessado em 04 de Mar. de 2003.
- VIGON, B.W. et al, **Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles**, EPA, Cincinnati, 1993.

- VIRTANEN Y.; LUBKERT, B., **Life-Cycle Inventories and Evaluations of Energy Systems and Technologies**, *In: Expert Workshop on Life-Cycle Analysis of Energy Systems, Methods and Experiences*, OECD, Paris, 1992.
- WCD - WORLD COMMISSION ON DAMS, **Dams and development - A new framework for decision making**, WCD, Londres, 2000.
- WEISSENBERGER, S. et alli, **Greenhouse gas emissions and carbon cycle in boreal reservoirs**, *in Dams and Climate Change*, COPPE, Rio de Janeiro, 1999.
- WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING,L., **Environmental Assessment of Products, 2 vol.**, Kluwer Academic Press, Copenhagen, 1997.
- WRONA, L.M., **Pollution prevention in the steel industry- toward a zero waste plant**, *Iron and Steel Engineer*, (74) 6, 1997.
- YAMAMOTO, J.K et al., **Environmental impact reduction on the production of bleended Portland cement in Brazil**, *Environmental Geoscience*, 4(4), 1997.
- YOKOTE, A.Y., **Inventário de ciclo de vida da distribuição de energia elétrica no Brasil**, *Dissertação (Mestrado)*, 2v., Escola Politécnica/ USP, São Paulo, 2003.
- ZENHPFENNIG, J.C., **Comunicação pessoal- Itaipu Binacional**, em 21 de Jul. de 2003.

FLÁVIO DE MIRANDA RIBEIRO

**Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil-
Usina de Itaipu: primeira aproximação.**

Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (PIPGE/ USP) para obtenção do Título de Mestre em Energia.

vol. 2- Anexos

São Paulo
2003

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela A. 01- Identificação das usinas hidrelétricas brasileiras em operação em 2001, com potência instalada maior que 30 MW, em ordem decrescente de potência instalada (CBDB, 2002).	1
Tabela A.02- Características construtivas das usinas hidrelétricas brasileiras em operação em 2001, com potência instalada maior que 30 MW, em ordem decrescente de potência instalada.	7
Tabela B.01- Consolidação dos potenciais aspectos e impactos sociais, ambientais e econômicos de usinas hidrelétricas (adaptado de ABBASI et al., 2001; BRASIL, 2001; CESP, 1990; DUARTE, 2000; ELETROBRAS, 1983, 1986; ESPANHA, 1989; MAGRINI, 1994; PRICE; PROBERT, 1997; RASHAD, ISMAIL, 2000; THEMAG, 2001; WCD, 2000).	14
Tabela C.01- Áreas desapropriadas para construção da usina (ITAIPU BINACIONAL, 1982).	51
Tabela C.02- Área alagada pelo reservatório (ITAIPU BINACIONAL, 1981b).	51
Tabela D.01- Casas construídas nos conjuntos habitacionais de Itaipu em território brasileiro (ITAIPU BINACIONAL, 1994; THEMAG, 1982).	54
Tabela D.02- Casas construídas nos conjuntos habitacionais de Itaipu em território paraguaio (ITAIPU BINACIONAL, 1994; THEMAG, 1982.)	55
Tabela D.03- Evolução dos atendimentos médicos no Hospital Costa Cavalcanti (Jornal de Itaipu, 2001).	56
Tabela D04- Indicadores sócio econômicos de Foz do Iguaçu, antes e durante a obra de Itaipu (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979)	58
Tabela D.05- Indicadores sócio econômicos de Ciudad Pres. Stroessner e Hernanderias, antes e durante a obra de Itaipu (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979)	59
Tabela D.06- Dados de refeições em Itaipu (THEMAG, 1982).	59
Tabela D.07 – Quantidade de pessoas vinculadas à obra (ITAIPU BINACIONAL, 1987)	61
Tabela D.08- Distribuição, por tipo, das casas construídas nos conjuntos habitacionais de Itaipu em território brasileiro (ITAIPU BINACIONAL, 1994; THEMAG, 1982).	62

Tabela D.09- Distribuição, por tipo, das casas construídas nos conjuntos habitacionais de Itaipu em território paraguaio (ITAIPU BINACIONAL, 1994; THEMAG, 1982).	62
Tabela D.10- Distância estimada dos alojamentos até o canteiro de obras (ITAIPU BINACIONAL, 1994; REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979).	62
Tabela D.11- Distribuição, por distância, das casas construídas nos conjuntos habitacionais de Itaipu.	63
Tabela D.12- Quantidade de pessoas a transportar anualmente, entre os conjuntos habitacionais e a obra de Itaipu, por distância.	64
Tabela D.13- Número de viagens de ônibus entre os conjuntos habitacionais e a obra de Itaipu, para cada distância, em cada ano.	64
Tabela D.14- Distâncias percorridas para o transporte de operários entre os conjuntos habitacionais e a obra de Itaipu, por ano.	65
Tabela D.15- Verificação da estimativa de consumo de diesel.	71
Tabela D.16- Dados dos equipamentos e estimativas de consumo.	73
Tabela D.17- Identificação dos equipamentos utilizados nas categorias da EPA.	74
Tabela D.18- Fatores de emissão para equipamentos de construção (ESTADOS UNIDOS, 1985a)	75
Tabela D.19- Fatores de emissão para motores diesel estacionários de uso industrial (ESTADOS UNIDOS, 1985b)	75
Tabela D.20- Estimativa das emissões dos equipamentos de construção.	76
Tabela D.21- Estimativa final das emissões dos equipamentos de construção	76
Tabela D.22- Distância REPLAN para Itaipu (QUATRO RODAS, 1985, 1986).	77
Tabela D.23- Produção de cimento em 1977 pelas plantas fornecedoras da obra de Itaipu no Brasil (SNI, 1978).	79
Tabela D.24- Estimativa de fornecimento de cimento para Itaipu, por planta.	80
Tabela D.25- Distâncias das plantas fornecedoras de cimento até a obra (QUATRO RODAS, 1985; QUATRO RODAS, 1986).	80
Tabela D.26- Cálculo da distância para transporte de cimento para Itaipu.	82
Tabela D.27- Distâncias das plantas fornecedoras de cinzas até a obra (QUATRO RODAS, 1985, 1986).	83

Tabela D.28– Produção de aço bruto e laminado em 1977 pelas plantas fornecedoras de Itaipu (IBS, 1982)	87
Tabela D.29- Estimativa de fornecimento de aço estrutural para Itaipu, por planta.	87
Tabela D.30– Distâncias das plantas fornecedoras de aço estrutural para Itaipu (QUATRO RODAS, 1985; QUATRO RODAS, 1986).	88
Tabela D.31– Distâncias percorridas para o transporte de aço estrutural para Itaipu.	89
Tabela D.32- Dados dos equipamentos das centrais de ensilagem, por margem do canteiro (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)	90
Tabela D.33 – Estimativa do peso de aço na central de ensilagem, por cada margem do canteiro.	91
Tabela D.34 – Estimativa do consumo específico dos equipamentos das centrais de ensilagem.	92
Tabela D.35 – Peso dos equipamentos das centrais de britagem, por cada margem do canteiro de obras (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).	93
Tabela D.36- Potência dos equipamentos instalados na central de britagem, por margem do canteiro de obras (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)	93
Tabela D.37- Estimativa de consumo elétrico na britagem.	95
Tabela D.38- Peso das estruturas das centrais de concreto (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).	95
Tabela D.39- Potência instalada nas centrais de refrigeração, por sistema (ITAIPU BINACIONAL, 1994)	96
Tabela D.40- Balanço térmico do sistema de produção de água fria para os agregados (S1)	97
Tabela D.41 – Balanço térmico do sistema de produção de ar frio para refrigeração dos agregados graúdos (S3)	99
Tabela D.42– Capacidade do sistema de produção de gelo para o concreto (S4) (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)	99
Tabela D.43 – Estimativa de consumo energético das centrais de refrigeração.	100
Tabela D.44 – Estimativa do peso dos equipamentos da central de concreto (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).	100

Tabela D.45 – Potência dos equipamentos das centrais de concreto (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).	101
Tabela D.46 – Peso dos equipamentos das monovias (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)	102
Tabela D.47 – Potência dos equipamentos das monovias (adaptado de REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)	103
Tabela D.48 – Peso dos equipamentos dos cabos aéreos (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)	104
Tabela D.49 – Potência dos equipamentos dos cabos aéreos (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)	104
Tabela D.50– Peso dos equipamentos dos guindastes de torre (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).	105
Tabela D.51 – Potência dos equipamentos dos guindastes de torre (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)	105
Tabela D.52- Estimativas de consumos para o canteiro	106
Tabela D.53- Relação dos equipamentos permanentes da usina (ITAIPU BINACIONAL, 1989)	110
Tabela D.54– Estimativa de peso dos equipamentos eletromecânicos (CAVALCANTI, 1979)	111
Tabela D.55– Estimativa de peso dos equipamentos eletromecânicos, exceto geradores, turbinas e transformadores (CAVALCANTI, 1979)	111
Tabela D.56– Estimativa de peso dos equipamentos eletromecânicos (ITAIPU BINACIONAL, 1982)	111
Tabela D.57– Estimativa de peso dos equipamentos eletromecânicos sem turbinas, geradores, transformadores e condutos (ITAIPU BINACIONAL, 1982)	112
Tabela D.58- Dados de equipamentos do Vertedouro (ITAIPU BINACIONAL, 1994)	114
Tabela D.59 Dados de equipamentos da Barragem de Concreto (ITAIPU BINACIONAL, 1994)	115
Tabela D.60- Dados de equipamentos da Casa de Força (ITAIPU BINACIONAL, 1994)	117

Tabela D.61– Consolidação da estimativa do peso dos principais equipamentos eletromecânicos da usina (modificado de ITAIPU BINACIONAL, 1994).	124
Tabela D.62- Dados de equipamentos sem os principais (modificado de ITAIPU BINACIONAL, 1994).	125
Tabela D.63- Estimativa dos dados individuais dos equipamentos eletro- mecânicos principais da usina.	129
Tabela D.64- Consolidação das quantidades de equipamentos permanentes utilizadas em 100 anos de operação da usina.	135
Tabela D.65- Consumos de aço e cobre pelos equipamentos permanentes em 100 anos de operação de Itaipu.	136
Tabela D.66– Exemplos de peças de grandes dimensões e peso transportadas para Itaipu (CAVALCANTI, 1979)	137
Tabela D.67– Principais fabricantes de equipamentos eletromecânicos (ITAIPU BINACIONAL, 1982, 1983).	138
Tabela D. 68– Prováveis fases das emissões de reservatórios (adaptado de ROSA, SANTOS, 1999)	142
Tabela D.69– Emissões estimadas de gases de efeito estufa de alguns reservatórios (DUCHEMIN, 2001)	154
Tabela D.70– Dados de geração até 2002 (ITAIPU BINACIONAL, 2002).	156
Tabela D.71- Resumo dos dados do Anexo D, com valores de consumos e emissões referentes aos 100 anos de operação.	159
Tabela E.01 - Perfil de refino admitido (YOKOTE, 2003)	164
Tabela E.02- Quantificação de aspectos ambientais para a extração de petróleo <i>off shore</i> (PRE CONSULTANTS, 2003)	167
Tabela E.03- Quantificação de aspectos ambientais para a extração de petróleo <i>on shore</i> (PRE CONSULTANTS, 2003)	168
Tabela E.04- Quantificação de aspectos ambientais para a extração de petróleo importado (PRE CONSULTANTS, 2003).	168
Tabela E.05- Inventário de ciclo de vida dos derivados de petróleo.	170
Tabela E.06- Composição do uso de combustíveis nas usinas termelétricas brasileiras em 1978 (ELETROBRAS, 1983).	172

Tabela E.07- Valores de geração de calor e emissões por combustível (PRE CONSULTANTS, 2003)	173
Tabela E.08- Inventário de ciclo de vida da eletricidade transmitida.	174
Tabela E.08- Fatores de consumo e emissões para caminhões 30t (REINO UNIDO, 2003).	176
Tabela E.09- Fatores de consumo e emissões para uso em transporte rodoviário.	177
Tabela E.10- Fatores de consumo e emissões para uso em transporte de ônibus . (REINO UNIDO, 2003).	177
Tabela E.11- Fatores de emissão para locomotivas (adaptado de NAEI, 2003)	178
Tabela E.12- Fatores de consumo e emissões para uso em transporte ferroviário.	179
Tabela E.13- Fatores de consumo e emissões para uso em transporte marítimo em petroleiro (PRE CONSULTANTS, 2003).	180
Tabela E.14- Inventário de ciclo de vida dos processos de transporte.	181
Tabela E.15 – Dados das plantas australianas de cimento, e estimativa de alocação da capacidade produtiva por tipo de forno (adaptado de RMIT, 2003).	185
Tabela E.16- Consumos e emissões da produção de cimento.	190
Tabela E.17- Consumos e emissões para a obtenção de clínquer por via seca.	193
Tabela E.18- Consumos e emissões da obtenção de clínquer pela via úmida.	194
Tabela E.19- Consumos e emissões da obtenção de farinha crua.	196
Tabela E.20- Inventário de ciclo de vida do cimento Portland.	198
Tabela E.21- Tipos de forno e cálculo da alocação por processo de refino no estudo de RMIT (2003).	205
Tabela E.22- Consumos e emissões da laminação do aço.	210
Tabela E.23- Consumos e emissões da produção de 1,0t de lingotes em fornos LD	213
Tabela E.24- Consumos e emissões da produção de 1,0t lingotes em fornos SM.	215
Tabela E.25- Consumos e emissões da produção de 1,0t de lingotes em fornos elétricos.	217
Tabela E.26- Consumos e emissões na produção de 1,0t de gusa em alto-forno à coque.	221
Tabela E.27- Consumos e emissões para a produção de 1,0 t de gusa em alto forno à carvão vegetal.	223
Tabela E.28- Consumos e emissões da produção 1,0t de sinter.	226

Tabela E.29- Consumos e emissões para a produção de 1,0 t de coque.	229
Tabela E.30- Consumos e emissões da obtenção de 1,0t de carvão vegetal	236
Tabela E.31- Inventário de ciclo de vida do aço laminado.	238
Tabela E.32- Inventário de ciclo de vida do cobre.	241

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura C.01- Localização da usina de Itaipu no mapa-múndi.	26
Figura C.02- Localização da usina na Bacia do Rio Paraná (ITAIPU BINACIONAL, 2002).	27
Figura C.03- Vista aérea da usina (ITAIPU BINACIONAL, 2002).	27
Figura C.04- Arranjo físico da usina de Itaipu (ITAIPU BINACIONAL, 1994).	28
Figura C.05- Seção transversal típica da barragem principal (ITAIPU BINACIONAL, 2002).	29
Figura C.06- Seção transversal típica das barragens de concreto (ITAIPU BINACIONAL, 2002).	30
Figura C.07- Seção transversal da estrutura de desvio (ITAIPU BINACIONAL, 2002).	31
Figura C.08- Seção transversal da barragem de enrocamento (ITAIPU BINACIONAL, 2002).	31
Figura C.09- Seção transversal das barragens de terra (ITAIPU BINACIONAL, 2002).	32
Figura C.10- Perfil e vista superior das calhas do vertedouro (ITAIPU BINACIONAL, 2002).	32
Figura C.11- Aspecto geral da área do reservatório, com a divisão dos municípios vizinhos (ITAIPU BINACIONAL, 2002)	34
Figura C.12- Comparação da potência instalada por km ² para diversas usinas hidrelétricas brasileiras (adaptado de ITAIPU BINACIONAL, 2002)	34
Figura C.13- Cronograma geral, simplificado, da obra de Itaipu (adaptado de ITAIPU BINACIONAL, 1994).	37
Figura C.14- Fases de desvio do Rio (elaboração própria, a partir de ITAIPU BINACIONAL, 1989).	39
Figura C.15- Esquema do canteiro da margem esquerda (adaptado de REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).	41
Figura C.16- Fluxograma de operação da central de ensilagem.	45
Figura C.17- Fluxograma da Central de Britagem (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).	46
Figura C.18- Fluxograma das centrais de refrigeração (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).	47

Figura C.19- Fluxograma do funcionamento das monovias.	50
Figura D.01 – Variação de parâmetros de consumo e emissão em função da potência desenvolvida, para motor a diesel específico (elaborado a partir de dados de CETESB, 2003).	72
Figura D.02– Energia gerada e fator de capacidade de Itaipu desde a inauguração (adaptado de ITAIPU BINACIONAL, 2002).	157
Figura D.03- Estrutura dos processos no SimaPro.	160
Figura E.01- Ciclo de vida dos derivados de petróleo.	170
Figura E.02- Ciclo de Vida da eletricidade	173
Figura E.03- Fabricação do cimento Portland (modificado de RMIT, 2003)	187
Figura E.04- Produção de clínquer (modificado de RMIT, 2003)	190
Figura E.05- Obtenção da farinha crua.	194
Figura E.06- Modelo de ciclo de vida do aço.	208

SUMÁRIO

ANEXO A - USINAS HIDRELÉTRICAS DO BRASIL	1
ANEXO B - IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS DE USINAS HIDRELÉTRICAS	14
ANEXO C - CARACTERÍSTICAS DA USINA DE ITAIPU	22
C.1 Histórico do projeto de Itaipu	22
C.2 Empresas envolvidas no empreendimento.	24
C.3 Localização da usina	26
C.4 Arranjo físico da usina.	27
C.4.1 Canal de Desvio	28
C.4.2 Barragem principal	29
C.4.3 Barragem de concreto (lateral direita e contrafortes- direito e esquerdo)	29
C.4.4 Estrutura de desvio	30
C.4.5 Barragem de enrocamento	31
C.4.6 Barragens de terra	31
C.4.7 Vertedouro	32
C.4.8 Casa de força	33
C.4.9 Reservatório	33
C.5 A obra de Itaipu	35
C.5.1 Obras de infra-estrutura	37
C.5.2 Desvio do rio	38
C.5.3 Obras de concreto	39
C.6 Principais materiais utilizados no canteiro	42
C.6.1 Agregados (areia e brita)	42
C.6.2 Aglomerantes (cimento e cinzas)	43
C.6.3 Água e gelo	43
C.6.4 Aditivos para concreto	43
C.6.5 Aço44	
C.6.6 Explosivos	44
C.7 Descrição do canteiro de obras de Itaipu	44
C.7.1 Central de ensilagem	45
C.7.2 Central de britagem	45

C.7.3	Central de refrigeração	47
C.7.4	Central de armação e carpintaria	48
C.7.5	Central de concreto	49
C.7.6	Equipamentos de lançamento do concreto	49
C.8	Enchimento do reservatório- Áreas desapropriadas e população atingida	51
ANEXO D - ESTIMATIVAS DOS PROCESSOS DO CICLO DE VIDA DE ITAIPU		53
D.1	Obras de infra-estrutura	53
D.1.1	Obras de habitação	54
D.1.2	Obras de Infra-estrutura nos conjuntos habitacionais	55
a.	educação:	55
b.	saúde:	56
c.	utilidades	56
d.	atividades sociais	57
D.1.3	Obras de acesso ao canteiro de obras	57
D.1.4	Alteração das características das cidades vizinhas à obra.	58
D.1.5	Alimentação na obra.	59
D.1.6	Estimativa do consumo das obras dos conjuntos habitacionais	59
D.2	Transporte de operários	60
D.3	Escavações e Obras de Terra	65
D.3.1	Consumo de rocha e terra	66
D.3.2	Explosivos	67
D.3.3	Operação das máquinas de construção	67
a.	Metodologia utilizada	68
b.	Sobre as hipóteses assumidas nesta metodologia	69
c.	Cálculo das emissões	72
d.	transporte do diesel	76
D.3.4	Uso do solo	77
D.4	Produção de concreto	78
D.4.1	Consumo de insumos para o concreto	78
a.	consumo de cimento	78
b.	consumo de cinzas	82

c. consumo de água	84
d. areia natural	85
e. aditivos	85
f. aço estrutural	86
g. madeira para formas	89
D.4.2 Canteiro de Obras	89
a. central de ensilagem	90
b. central de britagem	93
c. central de refrigeração	95
d. central de concreto	100
e. monovias	102
f. cabos aéreos	104
g. guindaste de torre	105
h. consolidação dos valores do canteiro	106
i. comentários sobre as limitações destas estimativas	107
D.4.3 Iluminação da obra	107
D.5 Equipamentos Permanentes	109
D.5.1 Valores apresentados pela ITAIPU BINACIONAL (1989):	110
D.5.2 Valores apresentados pela CAVALCANTI (1979)	110
D.5.3 Valores apresentados pelo Relatório Anual de 1981 (ITAIPU BINACIONAL, 1982)	111
D.5.4 Valores apresentados pela ITAIPU BINACIONAL (1994)	112
D.5.5 Estimativa das quantidades de materiais em cada equipamento para uso neste trabalho.	125
a. turbinas	126
b. geradores	126
c. óleo lubrificante	127
d. transformadores	128
e. condutos forçados	129
f. outros	129
D.5.6 Modelagem dos equipamentos permanentes	130
a. construção da usina	131

b. operação da usina	131
D.5.7 Transporte dos equipamentos permanentes	137
D.6 Emissão de gases de efeito estufa pelo reservatório	138
D.6.1 Origem das emissões de gases de efeito estufa em reservatórios de hidrelétricas	140
D.6.2 Estudos de emissão de gases de efeito estufa em reservatórios brasileiros	143
D.6.3 Valores estimados para Itaipu	148
D.6.4 Comentários sobre as limitações desta estimativa	151
D.6.5 Comparação com valores de outros estudos	153
D.7 Geração de energia elétrica em Itaipu	155
D.8 Consolidação das estimativas dos processos do ciclo de vida de Itaipu.	158
ANEXO E - ESTIMATIVAS DOS PROCESSOS DE CICLO DE VIDA DOS INSUMOS	162
E.1 Petróleo e derivados	164
E.2 Eletricidade	171
E.3 Transportes	175
E.3.1 Transporte rodoviário	176
E.3.2 Transporte de ônibus	177
E.3.3 Transporte ferroviário	178
E.3.4 Transporte marítimo- Petroleiro	179
E.3.5 Transporte marítimo- Granel	180
E.4 Cimento	182
E.4.1 Apresentação do processo de obtenção do cimento Portland	183
E.4.2 Verificação da validade da base de dados de YOKOTE (2003) para o cimento usado em Itaipu	184
E.4.3 Estimativa dos aspectos ambientais do processo de obtenção de cimento no Brasil em 1977	186
a. fabricação do cimento	187
b. produção do clínquer	190
c. obtenção da farinha crua	194
d. obtenção da calcita	197
e. obtenção da gipsita	197

E.5 Aço	199
E.5.1 Apresentação do processo de obtenção do aço	200
a. preparo das matérias- primas	200
b. produção do ferro gusa	202
c. produção de aço	202
d. conformação mecânica	203
E.5.2 Verificação da validade da base de dados de YOKOTE (2003) para a indústria siderúrgica brasileira em 1977	204
E.5.3 Estimativas dos aspectos ambientais dos processos de obtenção do aço no Brasil em 1977	206
a. aço laminado	209
b. forno LD	211
c. forno SM	213
d. forno elétrico	216
e. alto-forno a coque	218
f. alto-forno a carvão vegetal	222
g. sinterização	224
h. coqueificação	226
i. obtenção minério de ferro	230
j. obtenção de carvão mineral	232
k. obtenção do carvão vegetal	233
l. produção de oxigênio	236
m. fundentes	237
n. sucata	237
E.6 Cobre	240

ANEXO A - USINAS HIDRELÉTRICAS DO BRASIL

Tabela A. 01- Identificação das usinas hidrelétricas brasileiras em operação em 2001, com potência instalada maior que 30 MW, em ordem decrescente de potência instalada (CBDB, 2002).

	Nome popular	Potência Inst. (MW) (ANEEL, 2001)	Início de operação	Bacia Hidrográfica	Rio	Proprietário	Construtor
Itaipu	Itaipu	12.600	1984	Paraná	Paraná	Itaipu Binacional	Unicon
Tucuruí I e II	Tucuruí	4001,00	1984	Amazônica	Tocantins	Eletronorte	Camargo Corrêa
Ilha Solteira	Ilha Solteira	3444,00	1971	Paraná	Paraná	CESP	Camargo Corrêa
Xingó	Xingó	3162,00	1994	São Francisco	São Francisco	CHESF	CBPO/ Constran/ Mendes Jr.
Paulo Afonso IV	Paulo Afonso	2462,40	1979	São Francisco	São Francisco	CHESF	CHESF/CETENCO/ M. Jr.
Itumbiara	Itumbiara	2124,00	1980	Paranaíba	Paranaíba	Furnas	Mendes Jr.
São Simão	São Simão	1710,00	1978	Paranaíba	Paranaíba	CEMIG	Imprégilo/CR Almeida
Gov. B. M. R. Neto	Foz do Areia	1676,00	1980	Iguaçu	Iguaçu	COPEL	CBPO
Jupia	Eng. Souza Dias	1551,20	1974	Paraná	Paraná	CESP	Camargo Corrêa
Luiz Gonzaga	Itaparica	1479,60	1988	São Francisco	São Francisco	CHESF	Mendes Jr./SERVIX
Itá	Itá	1450,00	2000	Uruguai	Uruguai	Eletrosul	CBPO
Marimbondo	Marimbondo	1440,00	1975	Grande	Grande	FURNAS	Mendes Jr.
Salto Santiago	Salto Santiago	1420,00	1980	Iguaçu	Iguaçu	Eletrosul	Camargo Corrêa
Água Vermelha	José E. Moraes	1396,20	1979	Paraná	Grande	CESP	Camargo Corrêa
Porto Primavera	Eng. Sérgio Motta	1320,00	1998	Paraná	Paraná	CESP	Camargo Corrêa

(continua)

Tabela A. 01-(continuação)

	Nome popular	Potência Inst. (MW) (ANEEL, 2001)	Início de operação	Bacia Hidrográfica	Rio	Proprietário	Construtor
Serra da Mesa	Serra da Mesa	1293,00	1998	Tocantins	Tocantins	FURNAS	Camargo Corrêa
Furnas	Furnas	1270,00	1963	Grande	Grande	FURNAS	Cia. Anglo Brás. De Constr.
Gov. N.ª B. Braga	Segredo	1260,00	1992	Iguaçu	Iguaçu	COPEL	DM- CESBE- SINODA
Salto Caxias	Salto Caxias	1240,00	1998	Iguaçu	Iguaçu	COPEL	DM
Emborcação	Emborcação	1192,00	1982	Paranaíba	Paranaíba	CEMIG	Andrade Gutierrez
Salto Osório	Salto Osório	1078,00	1975	Iguaçu	Iguaçu	GERASUL	Andrade Gutierrez
Sobradinho	Sobradinho	1050,30	1979	São Francisco	São Francisco	CHESF	Servix
Estreito	Luiz C. B. Carvalho	1050,00	1969	Grande	Grande	Furnas	Stenobras
Henry Borden	Henry Borden	889,00					
Três Irmãos	Três Irmãos	807,50	1991	Paraná	Tietê	CESP	Andrade Gutierrez
Paulo Afonso III	Paulo Afonso	794,20					
Cachoeira Dourada	Cachoeira Dourada	658,00	1958	Paraná	Paranaíba	CDSA	Mendes Jr./CONVAP
Esc. Eng. Makenzie	Capivara	640,00	1978	Paraná	Paranapanema	CESP	CBPO
Escola Politécnica	Taquaruçú	554,00	1989	Paraná	Paranapanema	CESP	Mendes Jr.
Itaúba	Itaúba	512,40	1978	Jacuí	Jacuí	CEEE	Camargo Corrêa
Nova Ponte	Nova Ponte	510,00	1994	Paranaíba	Araguari	CEMIG	Andrade Gutierrez
Mal M. de Moraes	Ex Peixoto	478,00	1956	Grande	Grande	FURNAS	CPFL/Ebasco
Paulo Afonso II	Paulo Afonso	443,00					

(continua)

Tabela A. 01-(continuação)

	Nome popular	Potência Inst. (MW) (ANEEL, 2001)	Início de operação	Bacia Hidrográfica	Rio	Proprietário	Construtor
Volta Grande	Volta Grande	437,00	1974	Grande	Grande	CEMIG	Mendes Jr.
Jaguará	Jaguará	425,56	1971	Grande	Grande	CEMIG	Mendes Jr.
Chavantes	Chavantes	414,00	1971	Paraná	Paranapanema	CESP	CBPO
Apolônio Sales	Moxotó	400,00	1977	São Francisco	São Francisco	CHESF	Mendes Jr.
Três Marias	Três Marias	396,00	1962	São Francisco	São Francisco	CEMIG	Copinto
Miranda	Miranda	390,00	1998	Paranaíba	Araguari	CEMIG	Consórcio Queiróz- Galvão
Machadinho	Machadinho	380,00	2002	Uruguai	Pelotas	GERASUL/GEAM	Camargo Corrêa
Nilo Peçanha	Nilo Peçanha	378,42					
Corumbá I	Corumbá	375,00	1997	Paranaíba	Corumbá	FURNAS	CNO
Rosana	Rosana	369,20	1987	Paraná	Paranapanema	CESP	CBPO
Luís E. Magalhães	Lajeado	361,00					
Nova Avanhandava	Rui Barbosa	347,40	1982	Paraná	Tietê	CESP	CBPO
Porto Colômbia	Porto Colômbia	320,00	1973	Grande	Grande	FURNAS	Constr. Bras. Reunidos
Mário Lopes Leão	Promissão	264,00	1977	Paraná	Tietê	CESP	CETENCO
Gov. P. de Souza	Capivari/Cachoeira	252,00	1970	Litorânea	Capivari	COPEL	
Balbina	Balbina	250,00	1989	Amazônica	Uatumã	ELETRONORTE	Andrade Gutierrez
Boa Esperança	Castelo Branco	237,30	1969			CHESF	Mendes Jr.
Passo Fundo	Passo Fundo	226,00	1973	Uruguai	Fundo	Eletrosul	Servix/Rabelo/Giobbi

(continua)

Tabela A. 01-(continuação)

	Nome popular	Potência Inst. (MW) (ANEEL, 2001)	Início de operação	Bacia Hidrográfica	Rio	Proprietário	Construtor
Funil	Funil	216,00	1969	Paraíba do Sul	Paraíba do Sul	FURNAS	Cristiani Nieslsen
Samuel	Samuel	216,00	1989	Amazônica	Jamari	Eletronorte	Norberto Odebrecht
Igarapava	Igarapava	210,00	1998	Grande	Grande	CEMIG	Norberto Odebrecht
Manso	Manso	210,00	1991	Rio Manso	Manso	COPASA	Mendes Jr.
Ilha dos Pombos	Ilha dos Pombos	189,73	1924			LIGHT	Brazilian Hydroelectric CO.
Paulo Afonso I	Paulo Afonso	180,00	1955			CHESF	CHESF
Jacuí	Jacuí	180,00	1962	Jacuí	Jacuí	CEEE	DNOS
Passo Real	Passo Real	158,00	1973	Jacuí	Jacuí	CEEE	TECHINT/ SADE
Álvaro Souza Lima	Bariri	143,10	1969	Paraná	Tietê	CESP	Camargo Corrêa
Barra Bonita	Barra Bonita	140,76	1964	Paraná	Tietê	CESP	TENCO
Guilman-Amorin	Guilman-Amorin	140,04	1997	Doce	Piracicaba	CEMIG	Andrade Gutierrez
Ibitinga	Ibitinga	131,49	1969	Paraná	Tietê	CESP	CETENCO
Fontes Nova	Fontes Nova	130,30	1980	Guandu	Rib. das Lajes	LIGHT	LIGHT
Dona Francisca	Dona Francisca	125,00					
Mascarenhas	Mascarenhas	123,00	1973	Doce	Doce	ESCELSA	ENGEVIX
Porto Estrela	Porto Estrela	112,00					
Euclides da Cunha	Euclides da Cunha	108,80	1965	Paraná	Paraná	CESP	Camargo Corrêa
Salto Grande	Salto Grande	102,00	1956	Doce	Guanhães	CEMIG	Christiani&Nielsen

(continua)

Tabela A. 01-(continuação)

	Nome popular	Potência Inst. (MW) (ANEEL, 2001)	Início de operação	Bacia Hidrográfica	Rio	Proprietário	Construtor
Pereira Passos	Pereira Passos	99,10	1962	Guandu	Rib. das Lajes	LIGHT	Morrison Knudsen
Armando A. Laydner	Jurumirim	97,70	1962	Paraná	Paranapanema	CESP	Servix
Vigário	Vigário	90,82	1950	Pirai	Pirai	LIGHT	Morrison Knudsen
Paraibuna	Paraibuna	85,00	1978	Atlântico Sul	Paraibuna	CESP	Camargo Corrêa
Canoas I	Canoas	82,50	1998	Paraná	Paranapanema	CESP	Andrade Gutierrez
Caconde	Caconde	80,40	1966	Paraná	Pardo	CESP	Camargo Corrêa
Sá Carvalho	Sá Carvalho	74,10					
Alecrim	Alecrim	72,00	1974	Rio Rib. do Iguape	Juquiá	CBA	CBA
Canoas II	Canoas	72,00	1998	Paraná	Paranapanema	CESP	Andrade Gutierrez
Lucas N. Garcez	Salto Grande	70,00	1960	Paraná	Paranapanema	CESP	CCN
Coaracy Nunes	Paredão	67,98	1975	Amazônica	Araguari	Eletronorte	ECEL
Sobragi		60,00					
Itupararanga		56,17					
Santa Branca	Santa Branca	56,05	1960	Paraíba do Sul	Paraíba do Sul	LIGHT	Cavalcanti Junqueira
Rosal	Rosal	55,00					
Itutinga	Itutinga	52,00	1955	Grande	Grande	CEMIG	Morrison Knudsen
Camargos	Camargos	48,00	1960	Grande	Grande	CEMIG	Morrison Knudsen
Canastra	Canastra	44,80	1956	Santa Maria	Santa Maria	CEEE	DNOS

(continua)

Tabela A. 01-(continuação)

	Nome popular	Potência Inst. (MW) (ANEEL, 2001)	Início de operação	Bacia Hidrográfica	Rio	Proprietário	Construtor
Juba I		42,00					
Juba II		42,00					
Guaricana		40,86	1957			Cia.F.Luz Paraná	Ebasco
Barra	Barra	40,40	1986	Rio Rib. do Iguape	Juquiá	CBA	CBA
Santa Clara	Santa Clara	40,00					
Salto do Iporanga		36,87					
Fumaça	Fumaça	36,40	1964	Rio Rib. do Iguape	Juquiá	CBA	CBA
Santa Cecília		34,96					
Americana	Americana	34,00	1949	Rio Piracicaba	Atibaia	CPFL	
Suiça	Suiça	33,40	1965	Rio Santa Maria	Santa Maria	ESCELSA	AEG
Armando S. Oliveira	Limoeiro	32,00	1966	Paraná	Pardo	CESP	Camargo Corrêa
Curuá-Una		30,30	1977			CELPA	CONTERPA
Funil	Funil	30,00	1962	Atlântico Sul	Contas	CHESF	SERVIX

Tabela A.02- Características construtivas das usinas hidrelétricas brasileiras em operação em 2001, com potência instalada maior que 30 MW, em ordem decrescente de potência instalada.

	BARRAGEM PRINCIPAL				RESERVATÓRIO			Tipo de Desvio de Rio (2)	
	Tipo (*)	Altura (m)	Comprimento crista (m)	Volume barragem (m ³)	Capacidade Reservatório (km ³)	Área do Reservatório (km ²)	Nº Realocados		
	CBDB, 2001							PALMIER, 1997	BORDEAUX, 1982
Itaipu	GA	196	1.064	5.300.000	29.000	1.350	42400		
Tucuruí I e II	TE/ER	95	10677	64300/5466	43000000	225000	23900		
Ilha Solteira	ER/PG/TE	74	6185	26276	21166000			E	
Xingó	VA	180	198	616	736000	6000	150		
Paulo Afonso IV	ER	30	7000	10000	50000	1600	52000		
Itumbiara	TE/PG	106	6260/520	37000/1820	17030000	76000	3700	E	
São Simão	TE/ER/PG	120	3611	27378	12540000	68000	14000		
Gov. Bento M. da Rocha Neto									
Jupiá	TE/ER/PG	43	5604	7300	3680			E	
Luiz Gonzaga	TE/ER	105	4150	16530	10700000	83400	40100		
Itá	ER/PG	123	830	8426	4900000	10300	19200		
Marimbondo	TE/PG	94	3100/500	13700/950	6150000			E	
Salto Santiago (Aux.1 dam)	TE	60	600	160	6750000	22500	1500	T	
Água Vermelha	TE/PG	67	3920	19600	11100000				
Porto Primavera	TE/PG	38	11385	8441	18500000				

(continua)

Tabela A.02- (continuação)

	BARRAGEM PRINCIPAL				RESERVATÓRIO			Tipo de Desvio de Rio (2)
	Tipo (*)	Altura (m)	Comprimento crista (m)	Volume barragem (m ³)	Capacidade Reservatório (km ³)	Área do Reservatório (km ²)	Nº Realocados	
	CBDB, 2001						PALMIER, 1997	BORDEAUX, 1982
Serra da Mesa						178400	6800	
Furnas (intake)	PG	43	120	101	22950000	144000	8500	T
Gov. Ney A de Barros Braga	ER	140	700	6700	3000000	8200	2700	
Salto Caxias								
Emborcação	TE/ER	158	1607	25000	17600000			
Salto Osório	ER/PG	67	1200	4280	1240000			
Sobradinho (dique A)	TE	20	1588	650	34100000	412400	72000	E
Estreito (Intake)	PG	26	90	82	1418000			G
Henry Borden								
Três Irmãos	TE/PG	57/67	3700	14000	13450000	82000	1600	
Paulo Afonso III								
Cachoeira Dourada	TE/PG	26	2838	561	470000			
Capivara	TE/ER	59	1650	10850	10500000			E
Taquaruçú	MV	17	80	-	-			
Itaúba	ER	90	385	3410	510000			G
Nova Ponte	PG/TE	112	1420	8300	12200000	44300	5000	

(continua)

Tabela A.02- (continuação)

	BARRAGEM PRINCIPAL				RESERVATÓRIO			Tipo de Desvio de Rio (2)
	Tipo (*)	Altura (m)	Comprimento crista (m)	Volume barragem (m ³)	Capacidade Reservatório (km ³)	Área do Reservatório (km ²)	Nº Realocados	
	CBDB, 2001						PALMIER, 1997	BORDEAUX, 1982
Marechal M. de Moraes	PG/VA	72	600	800	4040000			
Paulo Afonso II								
Volta Grande	TE/PG	56	1850	4059	2300000			
Jaguará	TE/PG/ER	71	1225	1220	450000			
Chavantes								
Moxotó	ER	34	2953	1700	1200000	8800	1000	
Três Marias	TE	75	2700	14250	19790000			
Miranda						5061	535	
Machadinho								
Nilo Peçanha								
Corumbá I								
Rosana	TE	30	2340	3370	1920000			
Luís Eduardo Magalhães								
Nova Avanhandava	TE	71	2088	1917	3100000		E	
Porto Colômbia	TE/PG	40	1652/498	2320/88	1524000		E	
Promissão	TE	52	3710	6895	740000		E	

(continua)

Tabela A.02- (continuação)

	BARRAGEM PRINCIPAL				RESERVATÓRIO			Tipo de Desvio de Rio (2)
	Tipo (*)	Altura (m)	Comprimento crista (m)	Volume barragem (m ³)	Capacidade Reservatório (km ³)	Área do Reservatório (km ²)	Nº Realocados	
	CBDB, 2001						PALMIER, 1997	BORDEAUX, 1982
Governador Parigot de Souza								
Balbina	TE/PG	39	2900	5160	11000	314700	1100	
Boa Esperança	ER/TE/PG	55	5266	3500	4500000			
Passo Fundo	TE/PG	46	636	575	1560000			
Funil	DC	85	385	270	890000			
Samuel	TE/PG	38	1000	7000	4500	57900	1800	
Igarapava	TE	25	1030	1106	470000	3896	75	
Manso	TE	62	600	1750	236000			
Ilha dos Pombos	PG	19	525	-	9000			
Paulo Afonso I	PG	19	4125	216	33000			
Jacui	PG	25	431	-	30000			
Passo Real	ER	58	3850	3400	3650000			
Bariri	TE/PG	33	856	1350	544000			
Barra Bonita	PG	33	480	200	3160000			
Guilman-Amorin								
Ibitinga	PG/TE	32	1555	2250	985000			

(continua)

Tabela A.02- (continuação)

	BARRAGEM PRINCIPAL				RESERVATÓRIO			Tipo de Desvio de Rio (2)
	Tipo (*)	Altura (m)	Comprimento crista (m)	Volume barragem (m ³)	Capacidade Reservatório (km ³)	Área do Reservatório (km ²)	Nº Realocados	
	CBDB, 2001						PALMIER, 1997	BORDEAUX, 1982
Fontes Nova								
Dona Francisca								
Mascarenhas	PG	30	553	245	39500			
Porto Estrela								
Euclides da Cunha	TE	92	312	2200	13400		T	
Salto Grande	-	31	250	59	78000			
Pereira Passos	TE	52	231	1700	21800			
Jurumirim	PG	50	484	430	6520000			
Vigário								
Paraibuna	TE	94	1285	7892	2470000			
Canoas I								
Caconde								
Sá Carvalho								
Alecrim	GA	55	207	170	10000			
Canoas II								
Salto Grande								

(continua)

Tabela A.02- (continuação)

	BARRAGEM PRINCIPAL				RESERVATÓRIO			Tipo de Desvio de Rio (2)
	Tipo (*)	Altura (m)	Comprimento crista (m)	Volume barragem (m ³)	Capacidade Reservatório (km ³)	Área do Reservatório (km ²)	Nº Realocados	
	CBDB, 2001						PALMIER, 1997	BORDEAUX, 1982
Coaracy Nunes (A)	TE	43	547	318	138000			
Sobragi								
Itupararanga								
Santa Branca	TE	54	325	1450	434000			
Rosal								
Itutinga	PG/TE	23	531	170	11000			
Camargos	TE/PG	36	600	451	792000			
Canastra	PG	24	174	12	370			
Juba I e II								
Guaricana	PG	30	95	15	6840			
Barra								
Santa Clara								
Salto do Iporanga								
Fumaça	CB	54	165	90	90000			
Santa Cecília								
Americana	PG	25	228	39	107000			

(continua)

Tabela A.02- (continuação)

	BARRAGEM PRINCIPAL				RESERVATÓRIO			Tipo de Desvio de Rio (2)
	Tipo (*)	Altura (m)	Comprimento crista (m)	Volume barragem (m ³)	Capacidade Reservatório (km ³)	Área do Reservatório (km ²)	Nº Realocados	
	CBDB, 2001						PALMIER, 1997	BORDEAUX, 1982
Suiça	PG	17	130	12	1300			
Limoeiro	TE	41	660	600	25400			
Curuá-Una	TE	26	600	528	472000			
Funil	PG	60	300	200	53000			

*** LEGENDA:**

TE : Terra; EN:Enrocamento; PG: Concreto gravidade; GA: Gravidade Aliviada; VA: Arco; MV: Arcos múltiplos

ANEXO B - IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

Tabela B.01- Consolidação dos potenciais aspectos e impactos sociais, ambientais e econômicos de usinas hidrelétricas (adaptado de ABBASI et al., 2001; BRASIL, 2001; CESP, 1990; DUARTE, 2000; ELETROBRAS, 1983, 1986; ESPANHA, 1989; MAGRINI, 1994; PRICE; PROBERT, 1997; RASHAD, ISMAIL, 2000; THEMAG, 2001; WCD, 2000).

RECEPTOR	FATOR AMBIENTAL	ASPECTO	IMPACTO	EFEITO SECUNDÁRIO
Meio Geobiofísico - Clima	Decaimento de matéria orgânica alagada	• emissão de gases de efeito estufa	Aumento do efeito estufa	Alteração clima global
	Existência do reservatório	• Aumento da evaporação • Aumento das perdas por infiltração	Alteração no ciclo hidrológico	<ul style="list-style-type: none"> • Alteração clima local • Aumento da neblina • Surgimento de brisas locais • Aplainamento picos temperatura
Meio Geobiofísico - Fauna Aquática	Existência reservatório	Dificuldade migração peixes;	<ul style="list-style-type: none"> • Alteração nos hábitos de alguns peixes (predação, reprodução, etc) • Problemas de adaptação de algumas espécies fluviais ao ambiente lacustre. • Prejuízo à espécies de peixes, principalmente algumas mais sensíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Interferência na composição quantitativa e qualitativa da fauna aquática. • Perda material genético e comprometimento de espécies em extinção
		Aumento temperatura da água.		
		Estratificação térmica		
		Estratificação química		
	Dissipação energia no vertedouro	Alta velocidade e turbulência no vertedouro		
	Mistura da água com N ₂ atmosf. no vertedouro	Supersaturação de nitrogênio na água		
	Crescimento de algas	Eutrofização		
	Grade para detritos	Aprisionamento de peixes		

(continua)

Tabela B.01-(continuação)

RECEPTOR	FATOR AMBIENTAL	ASPECTO	IMPACTO	EFEITO SECUNDÁRIO
Meio Geobiofísico – Fauna Aquática	Despejo de água a diferentes profundidades	Variação da temperatura à jusante		
	Passagem de peixes pela turbina	Morte dos peixes		
	Sedimentação	Aterramento das comunidades do fundo do reservatório.		
		Aumento turbidez da água		
		Redução do oxigênio dissolvido		
	Limpeza inadequada da área a ser alagada	Decaimento de matéria orgânica, com redução da qualidade da água.	<ul style="list-style-type: none"> • Alteração nos hábitos de alguns peixes (predação, reprodução, etc) • Problemas de adaptação de algumas espécies fluviais ao ambiente lacustre. • Prejuízo à espécies de peixes, principalmente algumas mais sensíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Interferência na composição quantitativa e qualitativa da fauna aquática. • Perda material genético e comprometimento de espécies em extinção
	Uso de explosivos na construção da barragem	Criação de ondas de choque		
	Uso de produtos químicos durante a construção e operação da usina	Contaminação do solo e águas		
	Enchimento do reservatório	Alteração dos fluxos à jusante		
	Flutuações de nível d'água	Possibilidade de impacto, isolamento ou extinção de espécies.		
Drageamento	Aumento turbulência, movimentando fundo do reservatório, que pode conter compostos tóxicos.			

(continua)

Tabela B.01-(continuação)

RECEPTOR	FATOR AMBIENTAL	ASPECTO	IMPACTO	EFEITO SECUNDÁRIO	
Meio Geobiofísico - Fauna Terrestre e Alada	Criação do reservatório	Perda de habitats	<ul style="list-style-type: none"> • Migração de populações • Mudança das cadeias alimentares existentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Adensamento populacional em áreas sem capacidade de suporte • Interferência na composição quantitativa e qualitativa • Perda material genético e comprometimento de espécies em extinção • Aumento da pressão sobre fauna remanescente através da fauna predatória 	
		Criação de habitat para aves	<ul style="list-style-type: none"> • 		
		Criação de obstáculo à locomoção.	<ul style="list-style-type: none"> • Ruptura de habitats. 		
	Existência de rede elétrica	Radiação eletromagnética	<ul style="list-style-type: none"> • Dano a organismos 		
Meio Geobiofísico - Flora	Existência do reservatório	Alagamento	Perda de patrimônio vegetal	<ul style="list-style-type: none"> • Interferência na composição quantitativa e qualitativa • Perda material genético e comprometimento de espécies em extinção • Redução disponibilidade alimentar para fauna • Aumento da pressão sobre remanescentes de vegetação adjacentes 	
			Perda habitats naturais		<ul style="list-style-type: none"> • Efeitos sobre a fauna.
			Interferência em unidades de conservação		
	Reflorestamento para contenção de erosões	Introdução de nova vegetação	Modificação de ecossistemas.		
	Criação do reservatório	Desmatamento			

(continua)

Tabela B.01-(continuação)

RECEPTOR	FATOR AMBIENTAL	ASPECTO	IMPACTO	EFEITO SECUNDÁRIO
Meio Geobiofísico - Recursos Hídricos	Criação e existência do reservatório	Alteração do regime hídrico da região	Atenuação dos picos de cheias/vazantes	
			Aumento do tempo de residência da água no reservatório	
			Alteração da vazão de descarga a jusante	
			Assoreamento do reservatório	
			Erosão das encostas a jusante e montante	
			Elevação do lençol freático e alteração do regime de águas subterrâneas	
			Aumento das perdas por evaporação e infiltração	
	Criação e existência do reservatório	Redução da velocidade de escoamento à jusante	Aumento da sedimentação	
			Aumento da erosão	
			Possibilidade de redução de vazões, com prejuízo à qualidade d'água	
		Regulação de vazões à jusante	Possibilidade de melhoria na qualidade e quantidade de água.	
		Alagamento de solos salinos	Aumento da salinidade da água	
		Alterações de fluxo no enchimento do reservatório	Dificuldade de diluição de poluentes, e outros problemas relativos à escassez de água.	

(continua)

Tabela B.01-(continuação)

RECEPTOR	FATOR AMBIENTAL	ASPECTO	IMPACTO	EFEITO SECUNDÁRIO	
Meio Geobiofísico - Recursos Minerais e Solo	Existência do reservatório	Aumento do carregamento (peso) sobre o solo	Instabilidade e possível Indução de sismos		
		Ocupação do solo	<ul style="list-style-type: none"> • Interferência no uso do solo • Interferência na atividade mineral • Perda de potencial mineral 		
		Regressão de deltas e praias.			
		Modificação do relevo da região			
	Construção Civil		Instalação de infraestrutura para construção civil	Degradação de áreas	
			Uso de material de construção	<ul style="list-style-type: none"> • Degradação das áreas de extração. • Uso de recurso natural 	
			Deslizamento de encostas e taludes		
			Erosão das margens		

(continua)

Tabela B.01-(continuação)

RECEPTOR	FATOR AMBIENTAL	ASPECTO	IMPACTO	EFEITO SECUNDÁRIO
Meio Social	Enchimento do reservatório	Perda de solo	<ul style="list-style-type: none"> • Perda área agricultável • Perda de benfeitorias nas propriedades 	<ul style="list-style-type: none"> • Interferência na organização socio-cultural – política • Interferência na organização física-territorial • Interferência em núcleos populacionais, industriais, comerciais, etc • Alteração demográfica de núcleos próximos • Surgimento de novos núcleos populacionais • Sobrecarga de equipamentos e serviços sociais (saúde, saneamento, educação, etc) • Desequilíbrio nas condições de saúde e alimentação • Alteração da demanda habitacional • Interferência no potencial turístico • Alteração na dinâmica histórica regional • Interferência nos usos múltiplos (navegação, recreação, irrigação, abastecimento, controle de cheias, turismo, etc) • Interferência no potencial madeireiro

(continua)

Tabela B.01-(continuação)

RECEPTOR	FATOR AMBIENTAL	ASPECTO	IMPACTO	EFEITO SECUNDÁRIO
Meio Social	Enchimento do reservatório	Reassentamentos compulsórios	<ul style="list-style-type: none"> • Mudança compulsória da população • Intensificação do fluxo populacional (emigração e imigração) • Interferência em populações indígenas e/ou outros grupos étnicos 	
		Alagamento de áreas de importância social	<ul style="list-style-type: none"> • Desaparecimento de sítios paisagísticos • Desaparecimento de edificações de valor cultural • Inundação de sítios arqueológicos • Desaparecimento de sítios espeleológicos 	
		Propagação de doenças pela água	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de saúde na população 	
	Existência do reservatório	Oferta de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Melhor qualidade de vida à população. 	
		Formação de barreira física	<ul style="list-style-type: none"> • Interrupção/desativação de sistemas de comunicação, transporte, etc • Dificuldade de transporte hídrico ao longo do rio • Melhoria de navegabilidade no reservatório 	
		Redução de risco de enchentes	<ul style="list-style-type: none"> • 	
		Risco de rompimento da barragem	<ul style="list-style-type: none"> • 	

(continua)

Tabela B.01-(continuação)

RECEPTOR	FATOR AMBIENTAL	ASPECTO	IMPACTO	EFEITO SECUNDÁRIO
Meio Social	Existência do reservatório	Possibilidade de usos múltiplos	• Agricultura, abastecimento, recreativo, turismo, etc.	
		Redução da quantidade de água	• Prejuízo à atividades de uso múltiplo	
	Variação de nível do reservatório	Risco de acidentes	•	
	Existência das instalações elétricas		•	

ANEXO C - CARACTERÍSTICAS DA USINA DE ITAIPU

Empreendimento de caráter binacional (Brasil e Paraguai), a usina hidrelétrica de Itaipu é atualmente o maior empreendimento de geração de energia em operação no mundo, com $12,6 \cdot 10^6$ kW instalados (ITAIPU BINACIONAL, 2002). Para os fins deste trabalho, nesta parte do texto apresentam-se de modo bastante resumido as principais características do empreendimento. Para maiores detalhes recomenda-se a consulta à bibliografia referenciada, principalmente ao livro “Itaipu Hydroelectric Project” (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

C.1 Histórico do projeto de Itaipu

A usina hidrelétrica de Itaipu encontra-se no Rio Paraná, que estabelece parte da fronteira entre Brasil e Paraguai. O interesse na construção do empreendimento partiu do governo brasileiro quando, no início da década de 60, constatou-se um rápido crescimento da demanda energética na região Sul e Sudeste do Brasil. Como desde 1955 estavam sendo realizados levantamentos hidrológicos na bacia do Paraná, através da empresa canadense Light, o governo brasileiro contratou a empresa de engenharia OMF para verificar a viabilidade de realizar um aproveitamento hidrelétrico na região (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

A idéia inicial era aproveitar o desnível existente no Salto Grande de Sete Quedas (ou Salto del Guáira), localizado a montante da confluência com o rio Iguaçu. Isto seria feito através de uma barragem a montante da queda (em território brasileiro), que desviaria o rio por um canal de 60 km de extensão pela margem esquerda (igualmente em território brasileiro), contornando Sete Quedas e retornando ao curso normal após o término da garganta do rio, onde seria localizada uma casa de força de 10.000 MW. Esta concepção unilateral foi abandonada devido à característica binacional da localidade, o que levou à proposição de um acordo entre os dois países (ITAIPU BINACIONAL, 1989).

Desta forma em Junho de 1966 os Ministérios de Relações Exteriores do Brasil e Paraguai assinaram a "Ata de Iguaçu", estabelecendo a intenção de juntos desenvolverem estudos sobre o aproveitamento dos recursos hídricos fronteiriços.

Posteriormente, em 1970, a responsabilidade pela condução dos estudos passou para a ELETROBRÁS- Centrais Elétricas Brasileiras S.A. e ANDE- Administración Nacional de Eletricidad, que estabeleceram as condições para realizar os estudos de viabilidade entre 1971 e 1974, quando foram conduzidos diversos estudos hidrológicos, geológicos, estruturais, econômicos, entre outros, para avaliar a localização e configuração ótima da usina. (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

Inicialmente foram determinados, por inspeções aéreas, visitas por terra e investigações pelo rio, dez locais potenciais para concentração dos estudos. Partiu-se então à elaboração de mapas topográficos (inexistentes para a região) e estudos geológicos e hidrológicos. Destes estudos determinou-se duas alternativas possíveis: uma única barragem no ponto mais elevado próximo à pequena ilha de Itaipu (aparente apenas em períodos de seca, localizada cerca de 14 km a montante da Ponte Internacional Foz do Iguaçu, que liga Brasil ao Paraguai); ou duas barragens, uma na parte mais baixa próxima à ilha de Itaipu e outra em Santa Maria (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

A segunda fase dos estudos aprofundou o conhecimento dos dois locais selecionados, realizando extensivos ensaios geológicos, geotécnicos, hidrológicos e batimétricos. Em 1972 divulgou-se um relatório afirmando que a melhor alternativa seria a construção de uma única barragem, onde se encontrava a Ilha de Itaipu (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

Após concluídos os estudos foi necessário criar um acordo entre os dois países que garantisse igualdade de condições nas negociações, e assinou-se então em Abril de 1973 o "Tratado de Itaipu". Este acordo criou a Itaipu Binacional, empresa responsável pelos estudos, construção, operação e comercialização da energia da usina, e que teve oficialmente seu primeiro Conselho de Administração e Diretoria Executiva empossados em Maio de 1974 (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

Durante as negociações do tratado, seguiu-se com os trabalhos técnicos, e ainda em Abril de 1973 iniciou-se a última parte dos estudos de viabilidade, já definindo as primeiras características e cronogramas para a obra. Foi realizado o projeto do canal de desvio do rio, um modelo hidráulico para ensaios do desvio, das barragens e outras estruturas, projeto das barragens de terra e enrocamento, preparo do planejamento preliminar da construção, estudos de suprimentos de materiais,

determinação das fronteiras do reservatório, cadastramento dos afetados pela barragem, estudos geotécnicos específicos para a obra e outras atividades que permitissem o início da construção.

Para realização de todas as atividades necessárias, a Itaipu Binacional decidiu formar um corpo técnico reduzido, dedicado à supervisão geral de engenharia, e contratar mão de obra especializada para a execução das diferentes tarefas. Grande parte das empresas ligadas direta ou indiretamente à construção civil dos dois países foi envolvida de algum modo na realização do empreendimento, principalmente tendo em vista a intenção de somente recorrer a fornecedores de materiais e insumos e prestadores de serviço estrangeiros quando não houvesse possibilidade de recorrer a empresas dos dois países (ITAIPU BINACIONAL, 1994). A relação das empresas envolvidas, separadas por responsabilidade na obra, encontra-se a seguir neste Anexo.

Uma vez estabelecida a Itaipu Binacional em Maio de 1974, designou-se um corpo executivo de diretores, que iniciou seus trabalhos licitando os equipamentos de construção pesada para escavação do canal de desvio do rio, projetando e construindo a infra-estrutura necessária e gerenciando o projeto e as especificações para a construção da usina (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

Em 1975 iniciaram-se as obras, com a primeira unidade geradora entrando em operação em 1984 e a décima-oitava em 1991. Para 2004 estão previstas mais duas unidades, atualmente em obras, o que ampliará a potência instalada da usina para 14.000 MW (ITAIPU BINACIONAL, s/d).

C.2 Empresas envolvidas no empreendimento.

Para a realização do projeto e da obra civil da usina, bem como para fabricação dos equipamentos, a Itaipu Binacional lançou mão de inúmeras empresas da área, tanto brasileiras e paraguaias como de outros países. A seguir é dada uma relação das principais empresas participantes, divididas por área de atuação (ITAIPU BINACIONAL, s/d).

- **coordenação geral de engenharia:** consórcio IECO-ELC, formado pela IECO - International Engineering Company Inc. (USA) e pela ELC Electroconsult Spa (Itália).

- **projeto de engenharia:**
 - Brasil:
 - Engevix Engenharia S.A. (vertedouro e barragem contrafortes direita);
 - Promon Engenharia Ltda. (barragem principal);
 - Themag Engenharia Ltda. (casa de força e áreas de montagem), e
 - Hidroservice Engenharia Ltda. (barragens de terra).
 - Paraguai: GCAP- Grupo Consultor Alto Paraná, formado por Bosio, Chase y Asociados S.R.L., Consultec S.R.L., Inconpar S.R.L., Paraconsult S.R.L. e Técnicpar S.R.L.
- **Planejamento da construção: consórcio formado pela Enge-Rio Engenharia e Consultoria S.A., Logos Engenharia S.A. e o GCAP (Paraguai):**
- obra civil: consórcio UNICON-CONEMPA:
 - UNICOM (Brasil): Cetenco Engenharia S.A., CBPO- Companhia Brasileira de Projetos e Obras, Camargo Corrêa S.A., Andrade Gutierrez S.A. e Mendes Junior S.A.;
 - CONEMPA (Paraguai): Barrail Hermanos S.A. de Construcciones, Cia. General de Construcciones S.R.L., Compañia de Obras de Ingenieria de Obras S.R.L., Ing Civil Hermann Baumann, Ing Juan Carlos Wasmos y Asociados e Jimenez Gaona y Lima- Ingenieros de construcciones;
- equipamentos eletromecânicos:
 - turbinas- geradores: consórcio CIEM, formado por:
 - Brasil: Bardella S.A. Indústria Mecânica, BSI- Indústrias Mecânicas S.A., Mecânica Pesada S.A., Siemens S.A., Voith S.A. Máquinas e Equipamentos;
 - Paraguai: CIE- consórcio de Ingenieria S.A., formado por Saguan S.R.L., 14 de julio S.R.L., Oti, Electromec S.A., Cotepa S.R.L.e Ing Dorino da Re;
 - Europa: AG Brown Boveri& Cie (Suíça), Alsthom Atlantique (França), Creusot Loire (França), Neyrpic (França), Brown Boveri&Cie AG (Alemanha), Siemens Aktiengesellschaft (Alemanha) e J.M. Voith GmbH (Alemanha);
 - transformadores Step-Up: consórcio CITRAN, constituído por: Brown Boveri S.A. e COEMSA- Construções Eletromecânicas S.A;

- pontes rolantes: Pohlig-Heckel AG do Brasil, Mecânica Pesada S.A., Ishikawagima do Brasil Estaleiros S.A., Bardella S.A. Indústria Mecânica, Sermec S.A.;
- condutos forçados: Bardoni ATB- Industria Metal Mecânica S.A.;
- comportas e equipamentos suplementares: Mecânica Pesada S.A., Bardella S.A. Indústria Mecânica, BSI Industria Mecânica S.A., BVS Bouchayer Viallet Schneider e Bardoni ATB Industria Metal Mecânica S.A..

C.3 Localização da usina

A usina de Itaipu se localiza no Rio Paraná, na fronteira do Brasil com o Paraguai, nas seguintes coordenadas geográficas: Latitude Sul 25°30' e Longitude Oeste 54°30' (ITAIPU BINACIONAL, s/d). O mapa apresentado na Figura C.01 apresenta esta localização no mapa-múndi.

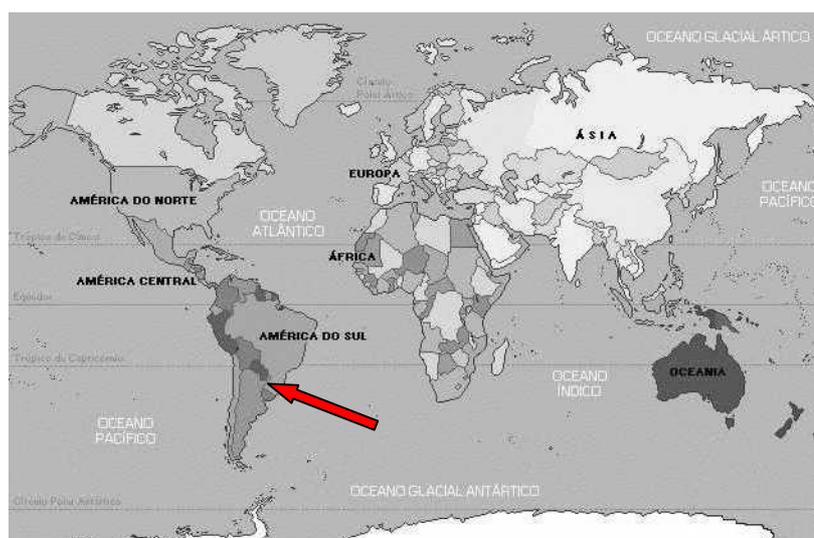


Figura C.01- Localização da usina de Itaipu no mapa-múndi.

O Rio Paraná, localizado na bacia hidrográfica de mesmo nome, origina-se da confluência dos rios Paranaíba e Grande (em território brasileiro), correndo em direção sudoeste até o Salto Grande de Sete Quedas, onde passa a formar a fronteira dos dois países até receber o rio Iguaçu. A bacia do rio Paraná possui cerca de 3.000.000 km², e devido à sua vazão e extensão da bacia, o rio é um dos sete maiores do mundo (ITAIPU BINACIONAL, 1989). A Figura C.02 ilustra a localização da usina na Bacia do Rio Paraná.



Figura C.02- Localização da usina na Bacia do Rio Paraná (ITAIPU BINACIONAL, 2002).

C.4 Arranjo físico da usina.

De modo a fornecer uma imagem geral do empreendimento, a Figura C.03 a seguir apresenta a vista aérea da usina em sua configuração atual (ITAIPU BINACIONAL, 2002).

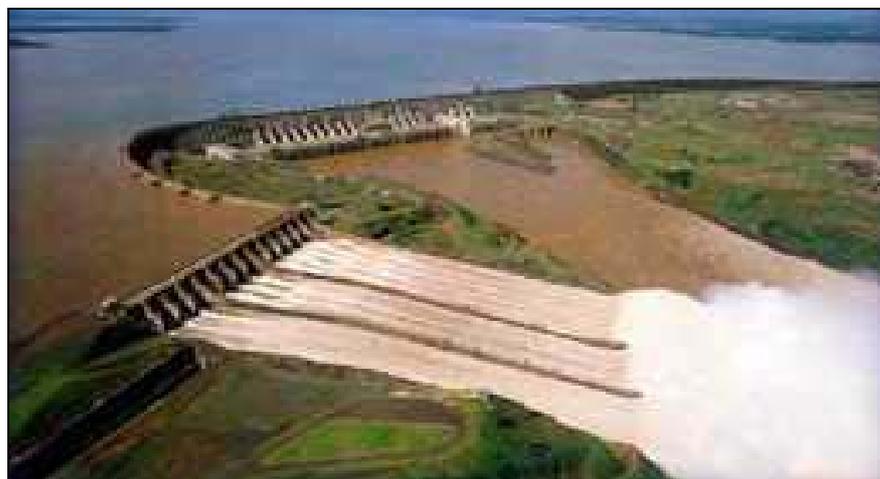
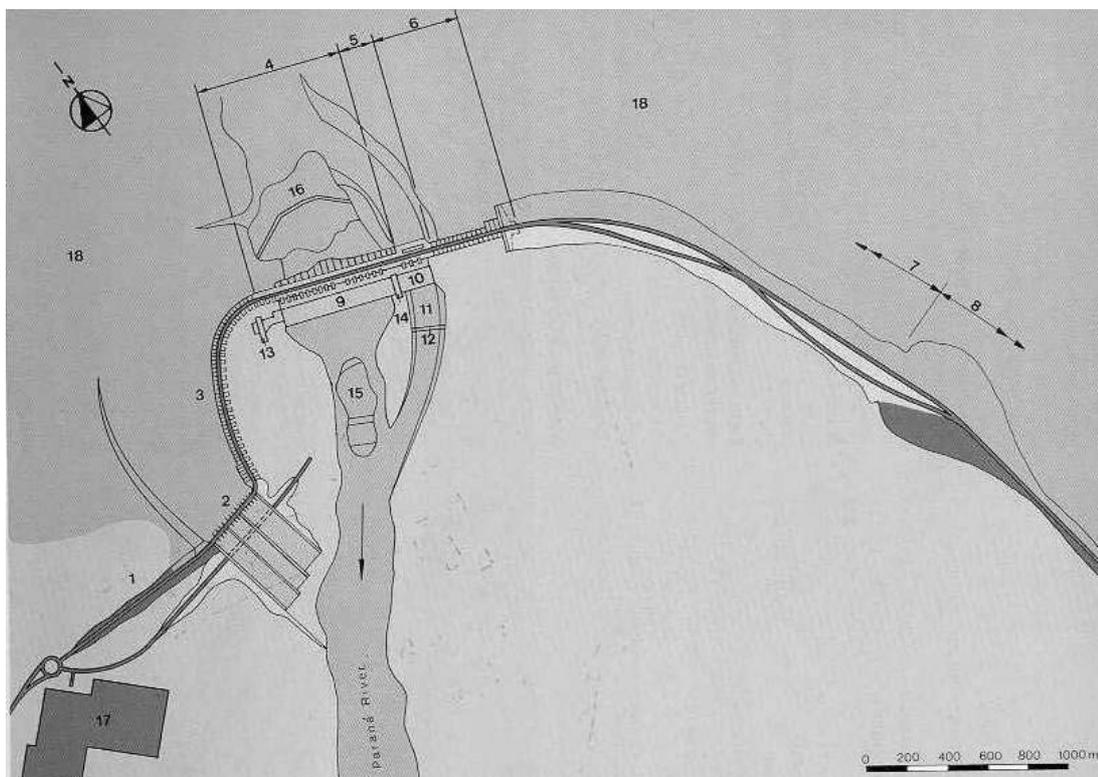


Figura C.03- Vista aérea da usina (ITAIPU BINACIONAL, 2002).

Para proporcionar uma noção mais objetiva das estruturas principais da usina no entanto, seu arranjo físico é apresentado na Figura C.04, a seguir (ITAIPU BINACIONAL, 1994).



LEGENDA

1- Barragem de terra – Lado Direito;	10- Casa de força- Canal de desvio;
2- Vertedouro;	11- Canal de desvio;
3- Barragem lateral direita;	12- Ponte de serviço;
4- Barragem principal e de ligação- Lado direito;	13- Área de montagem- Margem direita;
5- Estrutura de desvio;	14- Área de montagem- Margem esquerda;
6- Barragem de ligação- Lado Esquerdo;	15- Ensecadeira jusante;
7- Barragem enrocamento;	16- Ensecadeira- montante;
8- Barragem de terra – Lado Esquerdo;	17- Subestação;
9- Casa de força – Leito do rio;	18- Reservatório.

Figura C.04- Arranjo físico da usina de Itaipu (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

Com base na literatura da própria usina (ITAIPU BINACIONAL, 1989; 1994, s/d), a seguir as principais estruturas da usina são descritas.

C.4.1 Canal de Desvio

Para permitir a construção da barragem principal e da casa de força no leito, houve necessidade de desviar o rio Paraná. Para tanto, escavou-se na rocha um canal de

desvio na margem esquerda do rio, com dimensões aproximadas de 2.000m de extensão, 150m de largura e 90m de profundidade máxima.

Na estrutura definitiva da barragem, construiu-se no canal de desvio um trecho da casa de força, onde atualmente se encontram três das dezoito unidades geradoras (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

C.4.2 Barragem principal

Situada no leito do rio, a barragem principal é do tipo gravidade aliviada, composta de 18 blocos duplos de 34m de largura e altura máxima de 196m, atingindo 1.500m de extensão. Para sua construção foram empregados $5,3.10^6$ m³ de concreto, e houve necessidade de 500.000 m³ de escavação em terra e 2.200.000 m³ de escavação em rocha. A Figura C.05 a seguir apresenta a seção típica dos blocos.

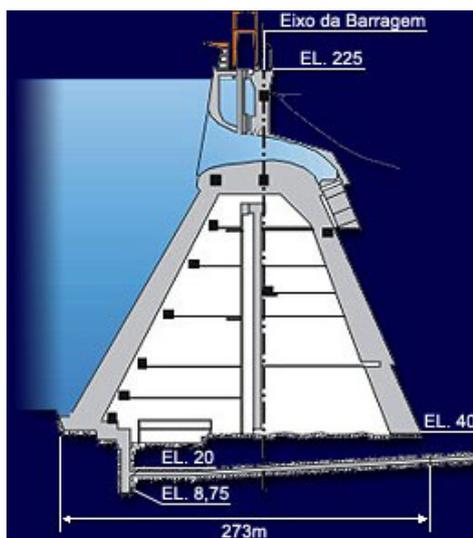


Figura C.05- Seção transversal típica da barragem principal (ITAIPU BINACIONAL, 2002).

C.4.3 Barragem de concreto (lateral direita e contrafortes- direito e esquerdo)

A barragem denominada “de concreto” em Itaipu, na verdade se divide em três estruturas: barragem de contrafortes direita, barragem de contrafortes esquerda e barragem lateral direita, que também é do tipo de contrafortes. Estas três partes apresentam a mesma seção transversal típica de seus blocos, que é apresentada na Figura C.06.

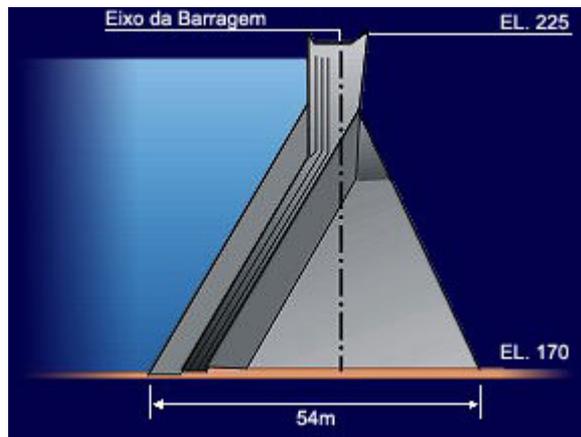


Figura C.06- Seção transversal típica das barragens de concreto (ITAIPU BINACIONAL, 2002).

A barragem lateral direita conecta o vertedouro à barragem de ligação do lado direito (até a barragem principal), e possui disposição em curva. Juntas, possuem 64 blocos de 17m de altura e largura variável, atingindo 986m de comprimento. Para sua construção foram empregados 775.000 m³ de concreto, e foram escavados 950.000 m³ de terra e 523.000 m³ de rocha.

A barragem de ligação do lado esquerdo é composta por 19 blocos, e conecta a estrutura de desvio à barragem de enrocamento.

C.4.4 Estrutura de desvio

A construção desta estrutura destinou-se a auxiliar no desvio do rio, para que fosse possível a construção da barragem principal e casa de força do leito, sendo posteriormente aproveitada para construção de parte das tomadas d'água. Para sua construção foram empregados 2.200.000 m³ de concreto, aplicados no canal de desvio já escavado. Sua seção típica é apresentada na Figura C.07.

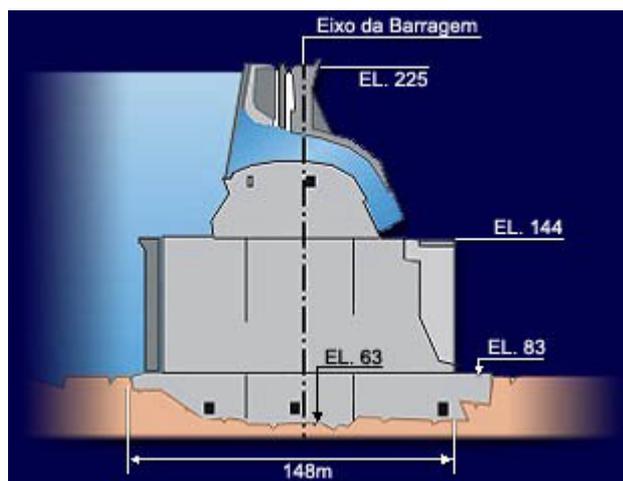


Figura C.07- Seção transversal da estrutura de desvio (ITAIPU BINACIONAL, 2002).

C.4.5 Barragem de enrocamento

A barragem de enrocamento possui 1.984m de extensão, com altura variando de 40 a 50m, e é constituída de um núcleo de argila impermeável e dois prismas rochosos externos. Esta solução foi adotada tendo em conta principalmente a disponibilidade de rocha procedente da escavação do canal, o que tornou a alternativa a mais economicamente atrativa. Para sua construção foram escavados 5.100.000 m³ e utilizados 4.400.000 m³ de material. A Figura C.08 apresenta sua seção típica.



Figura C.08- Seção transversal da barragem de enrocamento (ITAIPU BINACIONAL, 2002).

C.4.6 Barragens de terra

As barragens de terra foram utilizadas na usina de Itaipu onde o solo apresentava mais de 15m de capeamento, o que tornaria demasiadamente cara a construção de uma barragem de enrocamento. Na margem direita, a barragem de terra possui 872m

de extensão, e volume de 400.000 m³, e na margem esquerda, 2.294m de extensão e 4.200.000 m³ de volume. A altura máxima é de 30m e sua seção típica é apresentada na Figura C.09.



Figura C.09- Seção transversal das barragens de terra (ITAIPU BINACIONAL, 2002).

No total as barragens de Itaipu possuem coroamento na cota 225m e 7.744m de extensão.

C.4.7 Vertedouro

O vertedouro de Itaipu está localizado na margem direita, aproveitando as condições morfológicas existentes. Sua largura total é de 390m, com crista a 200m de altura e 14 comportas. De modo a facilitar a operação, este é dividido em três calhas separadas por muros divisórios, cada qual com seu perfil próprio. A Figura C.10 a seguir ilustra estes perfis.

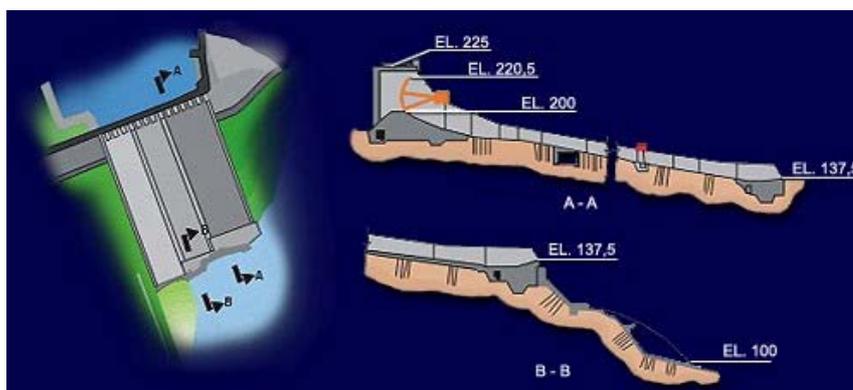


Figura C.10- Perfil e vista superior das calhas do vertedouro (ITAIPU BINACIONAL, 2002).

Para construção do vertedouro foram consumidos 800.000 m³ de concreto, e escavados 7.100.000 m³ de terra e 5.200.000 m³ de rocha.

C.4.8 Casa de força

A casa de força da usina de Itaipu está localizada ao pé da barragem principal, e é dividida em duas partes, separadas pela área de montagem esquerda localizada na ilha de Itaipu. No total, esta tem capacidade para abrigar 20 conjuntos turbina-gerador, 18 instalados inicialmente (15 na casa de força do leito e três na casa de força do canal) e mais dois previstos para 2004 (um em cada casa de força). Para sua construção foram empregados 3.200.000 m³ de concreto e foram necessárias escavações de 1.200.000 m³ de terra e 4.300.000 m³ de rocha.

Os principais equipamentos existentes tanto na casa de força como em outras estruturas são relacionado na Tabela D.57, do Anexo D.

C.4.9 Reservatório

Com o nível d'água normal (cota 220m), o reservatório da usina de Itaipu possui capacidade para 29 bilhões de m³ de água, cobrindo uma área de 1.350 km², se estendendo por 170m. Cabe dizer que imagens do satélite Landsat determinaram em 1999 uma área de 1.549 km² para o lago de Itaipu (SANTOS, 2000).

Para seu enchimento foram necessários 14 dias, e desapropriou-se uma área de 200m de largura, além da cota 225m, para sua formação. Foi necessária a aquisição de cerca de 1.000 km², incluindo 8.500 propriedades e o deslocamento de 40.000 pessoas, 87% das quais permanecendo nas proximidades da usina. Dados adicionais sobre estas áreas alagadas e sobre a população atingida são apresentados no final deste Anexo.

A Figura C.11 apresenta uma representação da área do reservatório.



Figura C.11- Aspecto geral da área do reservatório, com a divisão dos municípios vizinhos (ITAIPU BINACIONAL, 2002)

Cabe dizer que em comparação com outras usinas hidrelétricas, Itaipu apresenta uma posição privilegiada na relação entre área alagada e potência instalada, devido à topografia peculiar da região. São 107,14 km²/GW, considerada por muitos como uma usina a fio d'água. O gráfico apresentado na Figura C.12 fornece uma comparação deste parâmetro (relação entre potência instalada e área alagada) entre Itaipu e algumas outras usinas brasileiras.

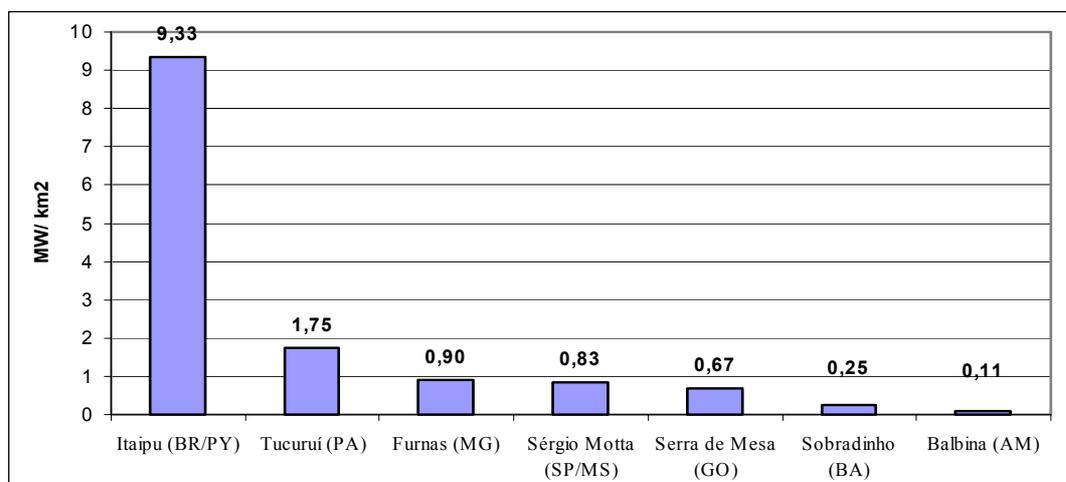


Figura C.12- Comparação da potência instalada por km² para diversas usinas hidrelétricas brasileiras (adaptado de ITAIPU BINACIONAL, 2002)

C.5A obra de Itaipu

Devido à magnitude do projeto e ao número de empresas e profissionais envolvidos na construção de Itaipu, houve necessidade de definir-se um cronograma de trabalho preciso e detalhado para a obra. Algumas atividades, como o desvio do rio ou a instalação do canteiro, foram consideradas “hiper-críticas”, pois seu atraso comprometeria todo o andamento da obra, e a estas foi dada especial atenção (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

De modo a atender as necessidades da obra, construiu-se um canteiro de obras de grandes proporções, além de toda uma infra-estrutura de apoio necessária (vilas residenciais, acessos, etc). Diversos equipamentos tiveram de ser encomendados com grande antecedência, pois não eram itens de catálogo, e muitos outros tiveram de ser fabricados sob encomenda. Desenvolveu-se um grande apoio logístico junto aos fornecedores, de modo a capacitá-los a fornecer os insumos em tempo e quantidade satisfatórios (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

Em 1975 a Itaipu Binacional estabeleceu como meta a entrada em operação da primeira unidade geradora no início de 1983, o que definiu um período de 7 anos para a obra. A parte das obras de infra-estrutura e da instalação do canteiro de obras, atividades que foram cuidadosamente previstas para ocorrer de modo concomitante às necessidades da obra, o desvio do rio foi a atividade mais crítica, em torno da qual se orientou o planejamento das atividades civis.

De modo bastante abrangente, as obras de construção da usina podem ser divididas em dois grupos: atividades desenvolvidas nas margens, independentes do desvio do rio e aquelas dependentes do desvio.

As atividades desenvolvidas fora do leito do rio contemplaram principalmente a construção do vertedouro e da barragem de contrafortes do lado direito, na margem direita, e parte da barragem principal, barragem de enrocamento e de terra na margem esquerda. Exceto pelo trecho da barragem principal na margem esquerda as demais obras puderam ser iniciadas com bastante antecedência, por serem totalmente independentes do desvio do rio.

Na verdade foi bastante conveniente, em termos de cronograma, realizar a construção das estruturas de concreto e da barragem de enrocamento o quanto antes. Por parte

das estruturas de concreto, esta medida evitou aumento nos picos de produção de concreto, que ocorreria caso fossem realizadas simultaneamente às estruturas de concreto do leito. Já a barragem de enrocamento sendo construída ao mesmo tempo que eram realizadas as obras de escavação do canal de desvio possibilitou a disposição direta da rocha, minimizando as operações de manuseio desta.

As atividades dependentes do desvio do rio foram principalmente as escavações no leito, a construção das barragens principal, contrafortes esquerda, estrutura de tomada d'água (utilizando a estrutura de desvio), barragem de ligação e a construção das casas de força, tanto no leito como no canal de desvio.

Como se pode perceber, durante a obra de Itaipu diversas atividades eram levadas em paralelo, buscando otimizar não apenas o tempo de execução, mas também a necessidade de equipamentos de construção e de produção e lançamento de concreto. O gráfico da Figura C.13 apresenta de modo bastante simplificado o cronograma das principais etapas da obra, desde seu início até a entrada em operação da primeira unidade geradora, em 1983.

1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Escavação parcial MD	Final escav. calha vertedouro		Construção calha vertedouro				
Construção canteiro MD	Construção parcial barr. contrafortes dir.		Constr. crista verted.			Finalização barr. contraf. dir.	
Projeto e compra comportas vertedouro		Fabricação comportas vertedouro		Instalação comportas vertedouro			
Projeto e compra pontes da casa força	Fabricação pontes casa força	Instalação pontes casa força	Montagem mancais				
	Escavação área montagem MD	Construção área montagem MD					
Projeto e compra turbinas e geradores	Fabricação partes turbina/gerador unidade 1		Fabricação demais partes unidade 1		Instalação rotor unidade 1		
		Escavação parte unidade 1	Final construção área montagem MD				
Escavação canal desvio	Desvio do rio.	Escavação e construção casa força	Instal tubo sucção e concretagem	Instal. mancal, caixa espiral	Instal. turbina e estator.	Instal. rotor gerador	Teste unid. 1
					Concret. casa de força	Constr. galerias e instal. equip. aux.	
					Final concretagem da casa força e instalação stop-logs		Remoção ensecadeira jusante
					Escav. e constr. barragem principal	Remoção cabos aéreos	Instal. tomad d'água
						Enchimento reservatório	
Projeto e compra comportas	Fabricação comportas unidade 1						
Projeto e compra condutos forçados unidade 1			Suprimento e instalação conduto forçado unid. 1			Instal. conduto forçado unid. 1	
					Fabric. comportas de desvio	Instal. comporta desvio	
		Escavação margem p/ barr. Principal	Concretagem estrut. desvio e barr. Principal			Final concretagem. Barr. principal e estrut desvio	
Escav barragem nrocam.	construção barragem enrocamento				Construção barragem terra		

Figura C.13- Cronograma geral, simplificado, da obra de Itaipu (adaptado de ITAIPU BINACIONAL, 1994).

A seguir apresentam-se algumas das etapas deste processo construtivo. Como já dito a princípio, dados adicionais podem ser encontrados no Anexo D.

C.5.1 Obras de infra-estrutura

A realização de um empreendimento do porte da usina de Itaipu exige uma estrutura de suporte compatível e que à época não era disponível na região. Milhares de

funcionários das mais diversas classes sociais e necessidades, juntamente suas famílias em muitos casos, realizaram uma migração temporária, criando demanda por habitação, serviços de água, esgoto, energia, abastecimento, saúde, educação, lazer, transportes, etc. Apenas para que se tenha uma ordem de grandeza, em 1974 (antes do início das obras) a população da cidade de Foz do Iguaçu era de 56 mil habitantes, sendo ao final (em 1980), 274 mil habitantes (THEMAG, 1982). Segundo informações de ANDRIOLO (2002), no pico das obras civis o valor da população nos arredores da obra chegou próximo aos 400 mil habitantes.

Além deste aspecto o enorme fluxo de materiais, combustíveis, alimentos, equipamentos, etc fez necessário a adequação do sistema de transporte de cargas na região, desde os centros fornecedores ou receptores (portos) até a obra.

Dados numéricos referentes ao número e área das residências, bem como informações sobre outras obras de infra-estrutura podem ser encontradas no Anexo D.

C.5.2 Desvio do rio

Para a construção do canal de desvio realizou-se uma escavação de 22.500 m³ de rocha e terra, o que gerou uma enorme quantidade destes materiais, posteriormente utilizados nas obras civis. Além disso, houve necessidade de construir-se duas ensecadeiras, a montante e jusante, e posteriormente duas barragens de arco de curvatura simples. Estas estruturas temporárias consumiram 11.320.000 m³ de terra e rochas e 35.000 m³ de concreto. Após a construção da estrutura de desvio, estas estruturas foram demolidas. A Figura C.14 a seguir descreve brevemente as fases de desvio do rio.

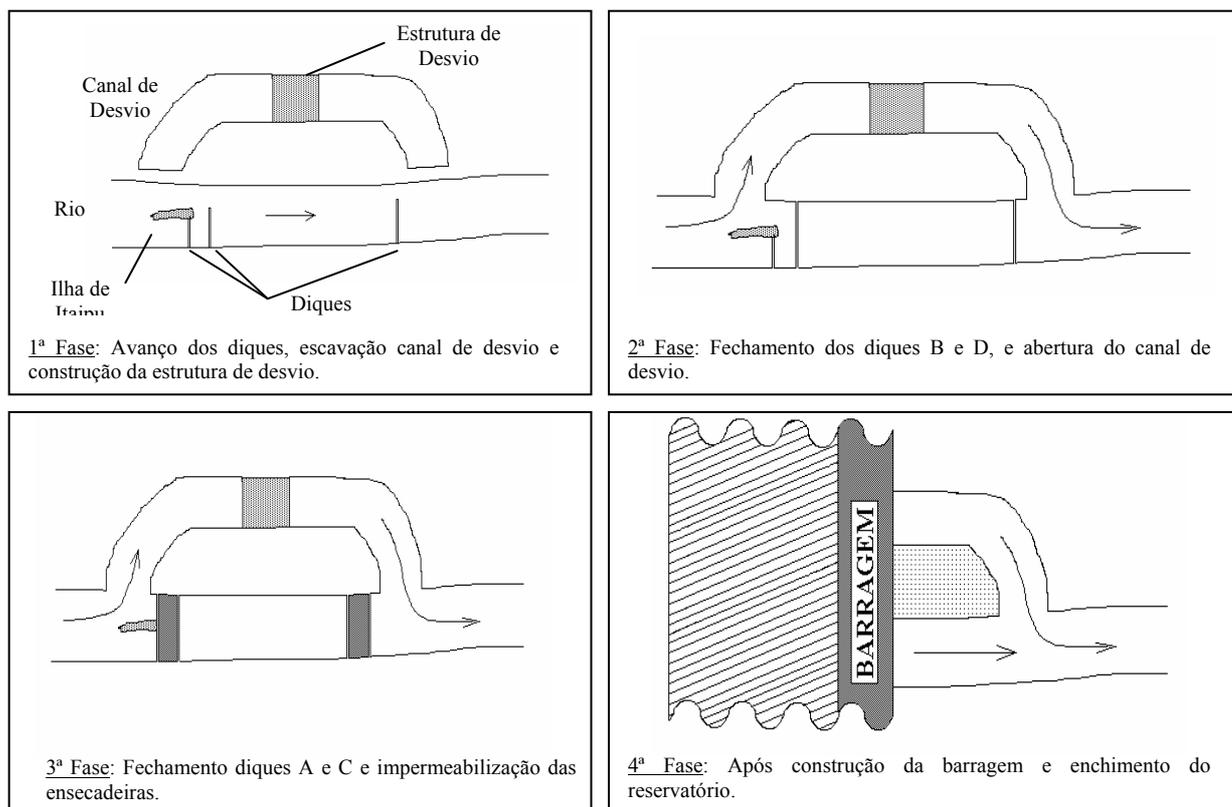


Figura C.14- Fases de desvio do Rio (elaboração própria, a partir de ITAIPU BINACIONAL, 1989).

Além desta obra de escavação, muitas outras obras de terra foram realizadas na construção de Itaipu, resultando em volumes escavados de $23,63 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de terra e $31,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de rocha. (ITAIPU BINACIONAL, 1981c). Estas quantidades exigiram o uso intenso de uma série de equipamentos de construção civil, que segundo ANDRIOLO (2002), em média eram utilizados à razão de 350 h/mês. A relação e características básicas destes equipamentos, bem como sua estimativa de uso, podem ser encontradas no Anexo D.

C.5.3 Obras de concreto

As barragens de Itaipu consumiram grandes quantidades de concreto. De modo a fornecer britas, concreto, armações, formas e demais itens necessários à execução das obras civis da usina, instalou-se em Itaipu um canteiro de obras que por si só equivaleria a um complexo industrial de grande porte (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

Sua singularidade reside tanto na capacidade de produção média e de pico, quanto na sua concepção, onde houve total liberdade dos engenheiros na definição das configurações, dimensões e especificações dos equipamentos, utilizando unicamente como critério a otimização de custos dentro dos prazos pré-fixados (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977). Apenas para que se tenha idéia da proporção do empreendimento, basta dizer que à época foram gastos US\$ 250 milhões na sua implantação, com índice de 80% dos equipamentos de origem nacional (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

Grande parte dos equipamentos utilizados não eram disponíveis em catálogo e tiveram de ser encomendados, e mesmo aqueles de catálogo não eram disponíveis para pronta entrega. Desta forma, foi necessário considerar o tempo de fabricação destes equipamentos no cronograma da obra, exigindo grande dose de planejamento. Além disso a maior parte estes equipamentos tiveram sua vida útil totalmente consumida na obra, sendo apenas uma pequena parte reutilizada após sua conclusão (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

A concepção do canteiro obedeceu a alguns critérios básicos de dimensionamento. Quanto ao volume de concreto, deveria atender uma capacidade máxima de produção de 300.000 m³/mês de concreto, resfriado a uma temperatura de 6°. Além disso o canteiro deveria ser modular, de modo a aumentar a confiabilidade do sistema, facilitar a manutenção e otimizar o transporte de materiais. Para tanto dividiu-se o canteiro nas seguintes estruturas, distribuídas em duas instalações equivalentes, uma em cada margem:

- central de ensilagem: composta de silos de armazenamento de cimento e cinzas, recebendo os materiais dos caminhões e alimentando a central de concreto;
- central de britagem: recebe as rochas escavadas e as transforma em britas e areia artificial, para uso na central de concreto;
- central de refrigeração: possui quatro sistemas de resfriamento: um para água fria, que realiza um primeiro resfriamento na brita; um para ar frio, que efetua um segundo resfriamento das britas; um de água fria para amassamento do concreto e o último para produção de gelo em escamas, para uso no mix do concreto;
- central de armação e carpintaria: composta por equipamentos de corte, dobra e solda das barras de aço, para produção das armações do concreto e de

equipamentos de preparo e corte da madeira, para obtenção das formas para o concreto;

- central de concreto: composta de betoneiras e equipamentos auxiliares, destinada a misturar os ingredientes e produzir concreto resfriado, e
- equipamentos de transporte e lançamento de concreto: são monovias, guindastes e cabos aéreos, destinados a levar o concreto desde as centrais até o local do lançamento.

Para evitar a futura remoção das instalações permanentes do canteiro antes do enchimento do reservatório, as instalações dos dois canteiros (margem esquerda e margem direita) foram localizadas a jusante da barragem. A Figura C.15 ilustra, de modo esquemático e simplificado, a localização destes equipamentos no canteiro da margem esquerda (ME). A margem direita possuía uma configuração semelhante, com diferenças de arranjo devido à topografia.

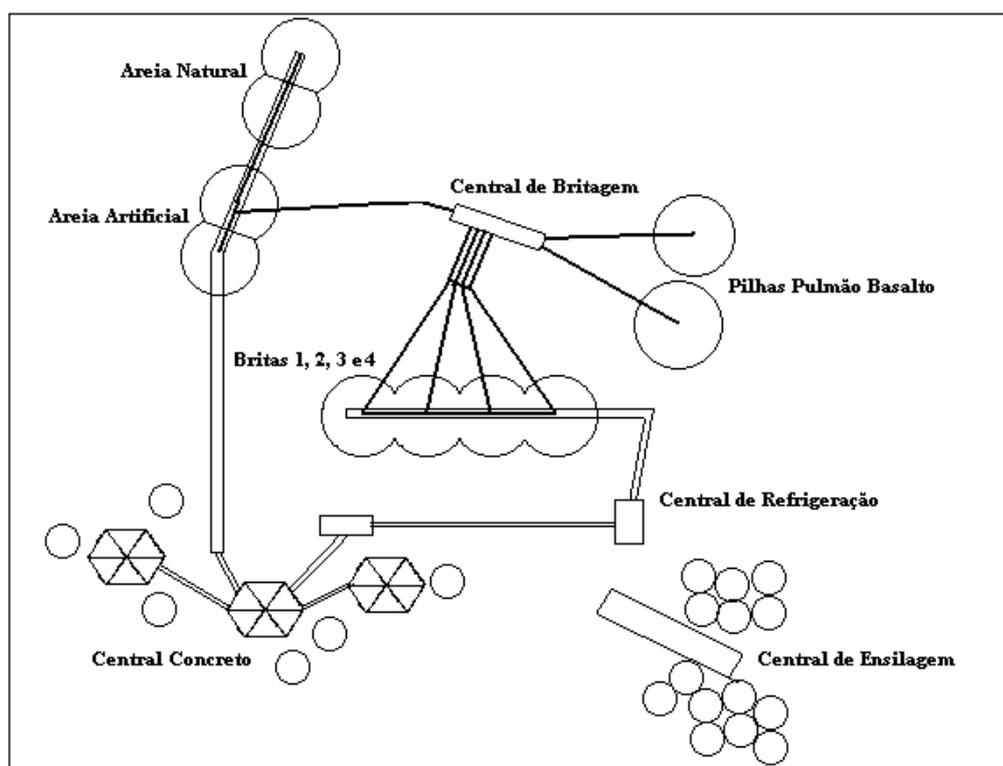


Figura C.15- Esquema do canteiro da margem esquerda (adaptado de REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

A seguir, apresenta-se primeiramente os principais consumos de materiais destas instalações, para em seguida descrever cada um dos principais componentes do

canteiro de obras, conforme dados fornecidos pela REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977).

C.6 Principais materiais utilizados no canteiro

Segundo dados fornecidos pelo pessoal da Divisão de Obras Civas da Itaipu Binacional (MESCOLIN, 2002), responsável pelo controle da produção deste material durante toda a obra da usina, foram usados para a construção do empreendimento 12.694.430,20 m³ de concreto. A seguir apresentam-se algumas informações relativas aos principais materiais utilizados para sua produção.

C.6.1 Agregados (areia e brita)

Para a produção do concreto necessário à obra, optou-se por utilizar ao máximo materiais provenientes do próprio local da obra, principalmente das escavações realizadas. Devido aos levantamentos geológicos efetuados preliminarmente, sabia-se que seriam geradas grandes quantidades de basalto de alta qualidade, o que reforçou a idéia de aproveitá-lo para a construção (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

Desta forma decidiu-se que todo o agregado graúdo para o concreto seria obtido da britagem da rocha extraída. Do mesmo modo, cerca de 70% da areia seria obtida da mesma forma. O restante da areia, 30%, foi obtido da dragagem do leito do rio Paraná, e mostrou-se de alta qualidade (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

O agregado foi então dividido em cinco categorias:

- areia: natural e artificial;
- brita 1: tamanho máximo (MSA) 19 mm;
- brita 2: MSA 38 mm;
- brita 3: MSA 76 mm, e
- brita 4: MSA 152 mm.

De acordo com dados da empresa (MESCOLIN, 2002), as quantidades usadas destes materiais foram:

- areia natural = 3.220.608.398,50 kg ou 2.190.890.067,01 m³;
- areia artificial = 5.792.736.254,00 kg ou 3.597.972.828,67 m³;
- brita 1 = 7.716.884.220,00 kg ou 4.884.103.936,71 m³;
- brita 2 = 4.596.625.138,50 kg ou 3.105.827.796,28 m³;

- brita 3 = 3.579.481.840,50 kg ou 2.468.608.165,86 m³, e
- brita 4 = 2.821.102.961,00 kg ou 2.015.073.543,57 m³.

C.6.2 Aglomerantes (cimento e cinzas)

O cimento usado na obra corresponde a classificação ASTM, tipo II (MESCOLIN, 2002).

Segundo dados da ITAIPU BINACIONAL (MESCOLIN, 2002), a quantidade total de cimento entregue foi de 2.475.828.070,50 kg, ou 1.980.662.456,40 m³.

Quanto às cinzas, segundo os dados da empresa (MESCOLIN, 2002), foram consumidas na obra 299.519.053,00 kg, ou 374.397.566,25 m³ de cinzas volantes de termelétrica.

C.6.3 Água e gelo

No preparo do concreto para a usina de Itaipu, parte da água de amassamento foi utilizada na forma de gelo, de modo a reduzir ainda mais a temperatura do concreto no lançamento. Ao contrário dos aglomerantes e agregados utilizados, não há registro preciso dos consumos de água e gelo, sendo necessário neste caso estimar valores médios em função da quantidade de concreto produzido.

Segundo estimativas do pessoal do Laboratório de Concreto da própria empresa (MESCOLIN, 2002), podemos utilizar como aproximação o valor médio de 170 kg água/m³ de concreto, sendo 80% deste valor na forma de gelo e apenas 20% no estado líquido. Desta forma, tem-se um consumo total de 2,158.10⁶ t de água para amassamento do concreto.

C.6.4 Aditivos para concreto

De modo a melhorar a qualidade do concreto, ou modificar seu tempo de pega, foram acrescentados aditivos ao concreto de Itaipu, variando a necessidade, quantidade e tipo de aditivo de acordo com o mix e o uso que seria dado ao concreto. Os principais aditivos utilizados e seu consumo sobre o peso de cimento, quando usados, foram (MESCOLIN, 2002):

- incorporador de ar: 0,05 a 0,15% do peso em cimento;

- plastificante e plastificante redutor de água: 0,20 a 0,30% do peso em cimento;
- superplastificante e super fluidificante: 1 a 3% do peso em cimento, e
- retardador de pega: 0,20 a 0,40% do peso em cimento.

É importante salientar que os valores acima são percentuais sobre o peso de cimento, aplicados apenas quando estes são acrescentados ao mix, o que dependia do uso da batelada de concreto sendo produzido naquele momento, não podendo ser portanto aplicados ao consumo total de cimento para estimativa de consumo. Segundo ANDRIOLO (2002), nenhum destes aditivos foi consumido em proporção realmente significativa, a exceção talvez do incorporador de ar. Além disso deve-se notar que em geral estes aditivos são compostos de 90% do peso em água, e o restante de resinas poliméricas.

C.6.5 Aço

De acordo com informações da ITAIPU BINACIONAL (MESCOLIN, 2002), para a construção das armações de concreto foram empregados 478.270 t de aço, na sua maioria em barras de aço CA-50 e CA-24 (ANDRIOLO, 2002).

C.6.6 Explosivos

Assim como no caso da água, não há informações disponíveis sobre o consumo de explosivos utilizados na obra. Segundo os técnicos da empresa (MESCOLIN, 2002), pode-se utilizar, para fins de estimativas aproximadas, o valor médio de 0,4 kg/m³ de rocha.

C.7 Descrição do canteiro de obras de Itaipu

A seguir são descritos os principais sistemas de produção de concreto instalados no canteiro, fornecendo seu princípio de operação. Dados sobre os principais equipamentos em cada unidade ou central, bem como suas principais características técnicas e estimativas de aspectos ambientais podem ser encontradas no Anexo D.

C.7.1 Central de ensilagem

De modo a desobstruir as circunvizinhanças das centrais de concreto, os silos de recebimento e armazenagem de aglomerantes (cinzas e cimento) foram posicionados em local próximo, embora não contíguo a estas.

Os aglomerantes são recebidos em moegas de descarga, de onde são enviados aos silos de armazenagem. Deste, passam aos silos de transferência de onde, por meio de transporte pneumático, são levados aos silos das centrais de concreto. O fluxograma da Figura C.16 ilustra esta seqüência.

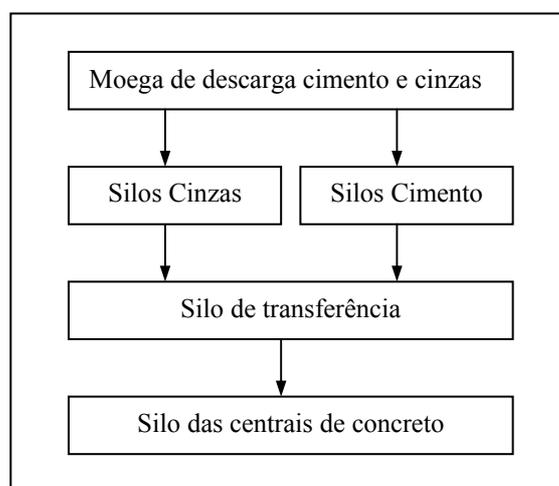


Figura C.16- Fluxograma de operação da central de ensilagem.

Cada uma das margens possui três grupos de silos, todos de 1.000 t de capacidade. Destes, dois grupos são para armazenagem de cimento, possuindo cada um três silos. O outro grupo de silos é destinado às cinzas, e possui apenas dois silos.

C.7.2 Central de britagem

As centrais de britagem são encarregadas de receber o basalto das escavações em rocha e convertê-lo, por processo mecânico de britagem, em pedaços menores, as britas. Nestas são produzidos cinco tamanhos diferentes de britado, como já citado, as chamadas brita 1, 2, 3 e 4, e a areia artificial, diferenciadas pelos diâmetros máximos aceitáveis- respectivamente 152 mm, 76 mm, 38 mm, 19 mm e 4,8 mm.

Para realizar esta operação foi instalada em cada margem uma central de britagem, sendo cada uma dotada de duas linhas idênticas em paralelo, que além de realizar a britagem classificam e destinam as britas produzidas para pilhas pulmão, que posteriormente, e mediante refrigeração, alimentam as centrais de concreto. Além disso também realizam o beneficiamento da areia natural, dragada do leito do rio Paraná. O fluxograma da Figura C.17 detalha estes procedimentos.

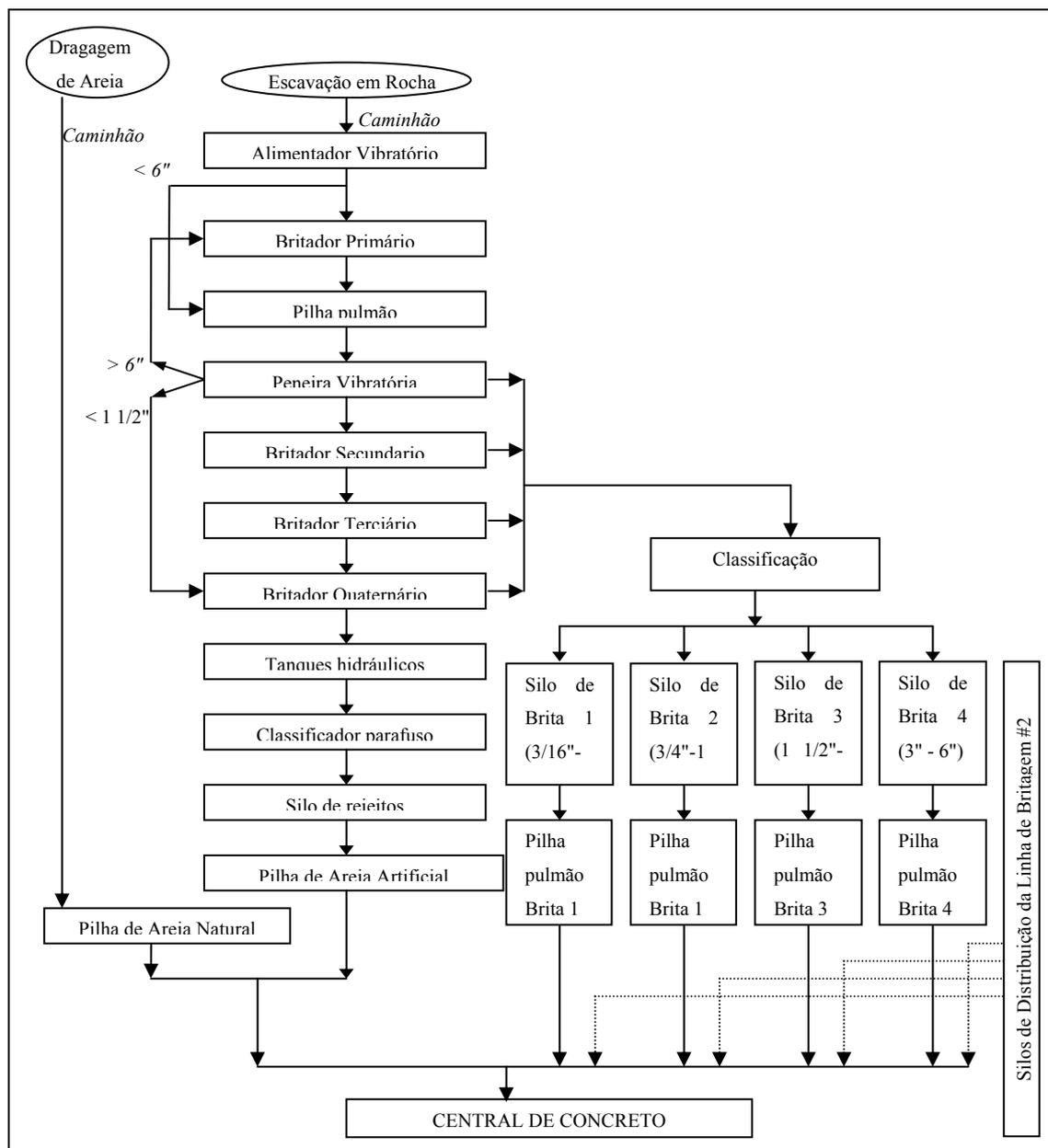


Figura C.17- Fluxograma da Central de Britagem (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

C.7.3 Central de refrigeração

Na aplicação de grandes quantidades de concreto faz-se necessário seu resfriamento, de modo a evitar problemas com a geração de calor durante a cura. No caso de Itaipu definiu-se que este problema seria contornado resfriando o concreto antes do lançamento, através da refrigeração de seus constituintes antes da mistura, de modo a que no momento do lançamento este estivesse à temperatura de 6°C. Desta forma, foram previstas três centrais de refrigeração, uma na margem esquerda e duas na margem direita.

A refrigeração do concreto é obtida através de quatro sistemas:

- S1: gera água fria, a 2,5°C, que é aspergida sobre as britas numa correia transportadora, retornando a 4,5 °C para evaporadores em circuito fechado;
- S2: produz água tratada fria, a 5 °C, que é utilizada tanto como água de amassamento do concreto como para a produção de gelo, uma vez que cerca de 80% do volume de água no concreto é misturada na forma de gelo em escamas (ITAIPU BINACIONAL, 2002);
- S3: refrigeração de ar (-17 °C), que é aplicado nos silos dos agregados graúdos, e
- S4: produção de gelo em escamas, a -10 °C.

O fluxograma da Figura C.18 detalha o processo.

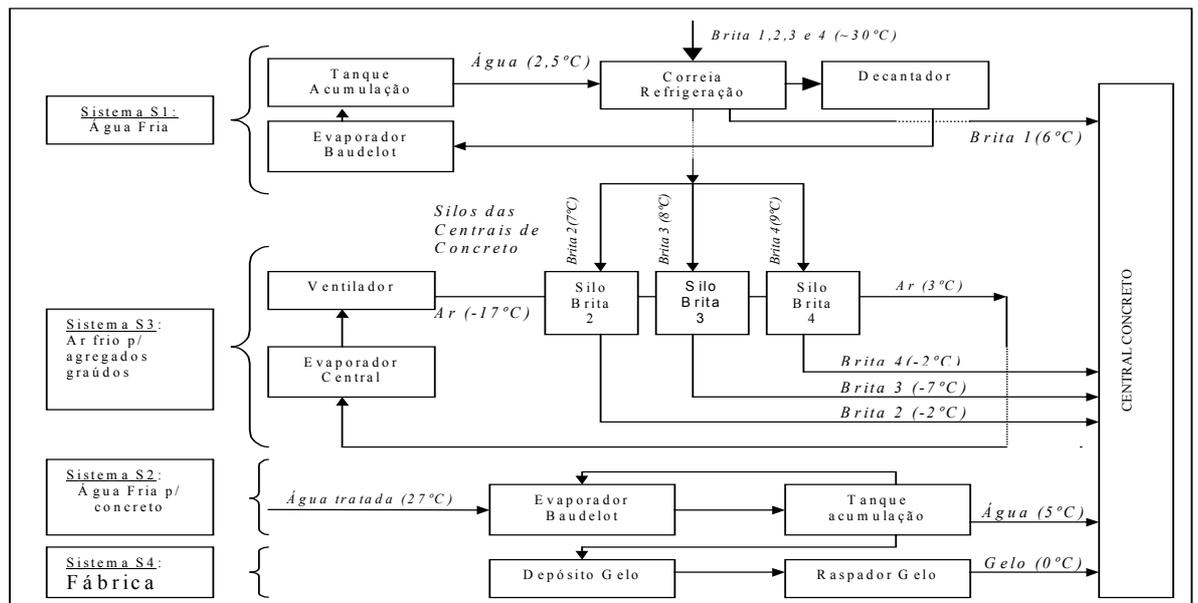


Figura C.18- Fluxograma das centrais de refrigeração (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

C.7.4 Central de armação e carpintaria

Cada canteiro de obras, tanto o da margem esquerda como o da margem direita, possuía uma central de armação e carpintaria, destinada a fornecer aço cortado e dobrado para as armações e madeira beneficiada para as formas do concreto a ser lançado. Os equipamentos destas centrais consistem basicamente de máquinas de corte, dobra e solda das barras de aço, além de uma ponte rolante, dois guindastes, serras, desempenadeiras, plainas, traçadeiras, pequenas furadeiras e tornos de madeira.

Os consumos destas centrais não serão incluídos nos cálculos do canteiro, devido à ausência de informações. Esta limitação no entanto não deve ser significativa, uma vez que exceto pelas pontes e guindastes os equipamentos eram todos de porte muito reduzido em comparação às demais centrais do canteiro, como apresentado na literatura (UNICON, 1978a, 1978b; REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977). Desta forma aqui apenas será brevemente descrito o funcionamento destas centrais.

Armações

As centrais de armações funcionam recebendo as barras dos caminhões e as transferindo para um estoque, utilizando a ponte rolante. As barras recebidas, segundo dados de projeto, seriam de duas categorias: 63% de CA-25 e 37 % de CA-50 (UNICON, 1978a).

As linhas de produção são alimentadas pela mesma ponte, a partir do estoque, para uma mesa onde são medidas e cortadas. Após o corte, podem ocorrer dois processos:

- barras são apenas cortadas, sem dobra, e então novamente estocadas em feixes, e
- barras são cortadas e dobradas, e então estocadas.

Segundo dados de projeto da UNICON (1978a), 51% do ferro seria utilizado reto, e 49%, dobrado. As pontas resultantes do corte são estocadas a parte, no estoque de pontas, para serem utilizadas posteriormente, visando redução das perdas.

Carpintaria

O consumo de formas para a obra foi, segundo dados de projeto da UNICON (1978b), estimado em 8.200 m²/mês. Considerando o consumo indicado neste relatório, de 0,06 m³ de madeira para cada m² de forma, temos um consumo de

madeira de 550 m³/mês. Segundo as previsões da UNICON (1978b), o consumo de madeira para uso no concreto entre Outubro de 1977 e Março de 1982 seria de 8.500 m³.

C.7.5 Central de concreto

De modo a atender à alta demanda de concreto estabeleceu-se que em cada margem seriam instaladas três centrais de concreto, cada qual com capacidade de 180 m³/h.

O funcionamento das centrais de concreto é bastante simples, consistindo basicamente em uma betoneira para preparo do concreto, e seus equipamentos auxiliares de estoque, alimentação, dosagem e transporte.

Após receber os aglomerantes e os agregados resfriados, além de água fria e gelo em escamas, dosa-se cada um destes para obtenção do mix desejado, e então a massa é misturada na betoneira. Incorporam-se além destes materiais os aditivos que se façam necessários, e após a mistura na betoneira o concreto, resfriado, é transportado para os equipamentos de lançamento.

C.7.6 Equipamentos de lançamento do concreto

a. monovias

As monovias são, basicamente, sistemas de transporte do concreto preparado, desde as betoneiras das centrais de concreto até os equipamentos que efetivamente realizam o lançamento, os cabos aéreos e os guindastes de torre. Para cada margem foi instalada uma monovia, que percorre as centrais de concreto e os equipamentos de lançamento do concreto.

Após sair da betoneira, o concreto é colocado em carros de transferência nos quais é conduzido até os carros da monovia, que correm por um monotrilho que atinge a plataforma dos cabos aéreos, onde transferem o concreto para os carros de transferência dos cabos. Uma vez completada esta operação os carros da monovia podem ir tanto para lavagem como para a manutenção, em função da necessidade. Por fim, os carros são enviados ao estacionamento, onde aguardam um novo ciclo. Todo este processo é controlado por uma torre de comando central.

O fluxograma da Figura C.19 resume este procedimento:

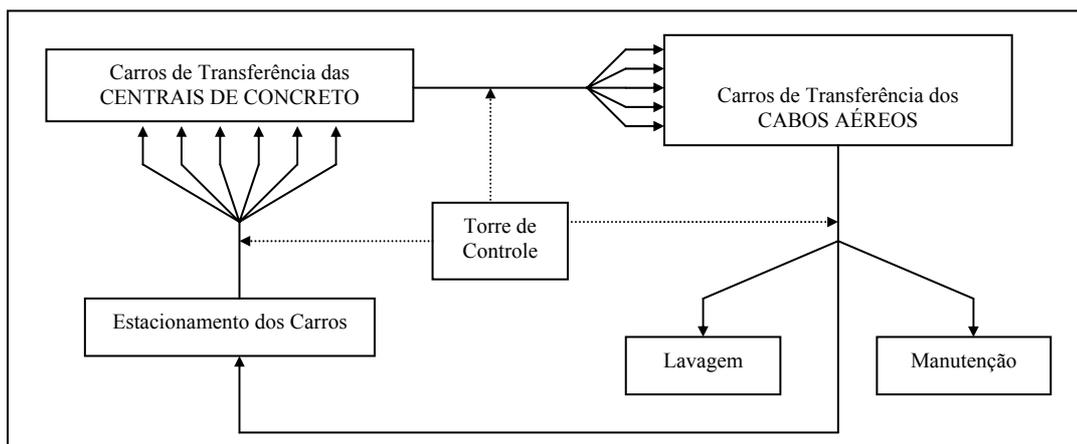


Figura C.19- Fluxograma do funcionamento das monovias.

b. cabos aéreos

Devido às características construtivas de Itaipu, principalmente às grandes dimensões da barragem, os sistemas tradicionais de lançamento de concreto não se mostravam técnica e economicamente viáveis para uso na obra. Desta forma, decidiu-se optar por um sistema alternativo, utilizando a tecnologia de cabos aéreos, que embora já fosse conhecida na construção civil nunca antes havia sido empregada numa obra de grande porte (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

Resumidamente o sistema era constituído de sete conjuntos de cabos aéreos, sustentados em cada margem por uma estrutura em formato de “A”, separados por um vão de mais de 100 m. Para o lançamento do concreto, este era transportado em caçambas de 3 ou 6 m³ através dos cabos, e as estruturas de suporte (em “A”) eram montadas sobre carros que corriam sobre trilhos, de modo a transladar os conjuntos ao longo da obra.

c. guindastes de torre

Os guindastes de torre são os equipamentos mais usuais de lançamento de concreto. No entanto, na obra de Itaipu estes foram responsáveis por lançar 20% do concreto, em geral em locais onde o uso dos cabos não se mostra viável ou vantajoso.

Basicamente o sistema é composto de oito conjuntos de guindastes com caçambas, alimentados pelas monovias.

C.8 Enchimento do reservatório- Áreas desapropriadas e população atingida

Para que fosse possível a operação da usina, decidiu-se ainda em 1974 levantar as condições de ocupação da área em torno do futuro reservatório, num total de 16.000 km² (ITAIPU BINACIONAL, 1974).

A desapropriação das áreas foi iniciada, ainda no segundo semestre de 1974, pelas áreas dos canteiros de obras e centro executivo, num total de 8.600 ha até 1978 (ITAIPU BINACIONAL, 1982). Em seguida desapropriou-se as áreas definidas para os conjuntos habitacionais e estruturas auxiliares, somando 413 ha na margem direita e 561 ha na margem esquerda. Já em 1977 foi realizado o cadastramento das áreas a serem desocupadas para a construção da usina. Estes dados são apresentados na Tabela C.01, a seguir.

Tabela C.01- Áreas desapropriadas para construção da usina (ITAIPU BINACIONAL, 1982).

Finalidade da área	ME (ha)	MD (ha)	Total (ha)
Área Prioritária	5.344	3.280	8.624
Conjuntos Habitacionais	561	413	974
Obras auxiliares	-	771	771
Reservatório	99.497	118.898	218.395
TOTAL	104.983	123.362	128.345

Posteriormente elaborou-se uma classificação mais precisa da área a ser alagada. Dos 1.350 km² do reservatório, 780 km² são em território brasileiro, e os restantes 570 km² são em território paraguaio. Tendo como base a divisão percentual apresentada por ITAIPU BINACIONAL (1981b), podemos dividir as áreas segundo o tipo de uso antes do enchimento do reservatório como apresentado na Tabela C.02.

Tabela C.02- Área alagada pelo reservatório (ITAIPU BINACIONAL, 1981b).

	Lado Brasileiro (ME)		Lado Paraguaio (MD)	
	%	Km ²	%	Km ²
Florestas	22,0	171,6	81,5	464,5
Capoeiras	24,8	193,4	13,1	74,7
Agricultura	50,3	392,3	-	-
Área urbana	2,0	15,6	-	-
Campos naturais	-	-	5,0	28,5
Outros	0,9	7,1	0,4	2,3
TOTAL	100	780	100	570

Segundo informações da ITAIPU BINACIONAL (1982), a maior parte dos atingidos (86%) deslocou-se para outras áreas do Estado do Paraná, principalmente para municípios na zona de influência do reservatório, enquanto pequenas parcelas se deslocaram a outros Estados, como Mato Grosso (8,89%) e Santa Catarina (1,16%). Além disso, de acordo com a empresa (ITAIPU BINACIONAL, 1982) foram reassentadas em projetos do INCRA 72 famílias em Bom Jesus da Lapa (Bahia), 191 no Acre e 401 em Arapoti (Paraná), num total de 3.982 pessoas.

Embora neste estudo não seja abordada a questão social relacionada à implantação das hidrelétricas, deve-se ressaltar que este talvez seja um dos principais temas a considerar quando da discussão de seus efeitos negativos.

ANEXO D - ESTIMATIVAS DOS PROCESSOS DO CICLO DE VIDA DE ITAIPU

Neste Anexo quantifica-se o consumo dos principais insumos (aço, cobre, cimento, transportes, diesel, óleo de transformador e lubrificante) e os fluxos de matéria e energia diretamente relacionados à obra de construção e à operação da usina de Itaipu, conforme comentado no Capítulo 5 do corpo de texto. Para tanto, utilizou-se as informações do Anexo C complementados de dados primários, quando disponíveis e de demais fontes da literatura.

De modo a manter a estrutura do sistema de produto utilizada no fluxograma de identificação dos aspectos, dado na Figura 5.02 do Capítulo 5, foram mantidas as nomenclaturas utilizadas para os processos relacionados à construção e operação da usina. Embora a ordem de coleta de dados tenha sido distinta, decidiu-se que esta forma de apresentar as informações traria um melhor entendimento das estimativas. No final deste Anexo apresenta-se a estrutura com a qual estes dados foram inseridos no SimaPro, que difere ligeiramente da nomenclatura e divisão dos processos aqui apresentados, de modo a dividir os processos entre a construção e operação da usina. Assim, a seguir são apresentadas as hipóteses e realizadas as estimativas referentes aos processos de: obras de infra estrutura, escavações e obras de terra, produção de concreto, transporte de operários, equipamentos permanentes, emissão de gases de efeito estufa e geração de eletricidade.

D.1 Obras de infra-estrutura

A construção da usina de Itaipu exigiu uma grande mobilização de mão de obra, e sua instalação na região por mais de dez anos da obra demandou o desenvolvimento de toda uma infra-estrutura, não apenas de moradia, mas também de saúde, educação, lazer, abastecimento, saneamento básico, etc.

Neste Anexo apresentam-se alguns dados relevantes sobre estas estruturas, de modo a fornecer ao leitor uma noção da dimensão desta empreitada. Ao final, faz-se uma estimativa da ordem de grandeza do concreto utilizado para esta finalidade, de modo a esclarecer sua dimensão perto da obra da barragem.

Cabe salientar que grande parte das estruturas criadas para a obra permanece até hoje em operação, tendo sido transferida para os municípios (que tiveram sua população aumentada em muitas vezes, como será evidenciado) ou sendo bens de posse da empresa e de uso diversificado, como por exemplo os hospitais construídos na época. Desta forma, admite-se que nos 100 anos do período de análise apenas uma pequena parcela dos gastos com estas obras deve ser atribuída à obra, resultando ao final numa contribuição que será considerada desprezível.

D.1.1 Obras de habitação

De modo a atender as necessidades dos funcionários da Itaipu Binacional e das empreiteiras vinculadas à obra, construíram-se mais de 9.000 residências, distribuídas em 3 conjuntos habitacionais na periferia de Foz do Iguaçu, para cerca de 21.000 pessoas, e mais oito conjuntos menores no Paraguai, abrigando cerca de 15.000 pessoas, além de alojamentos para operários (THEMAG, 1982).

A quantidade de casas construídas em território brasileiro é apresentada pela THEMAG (1982), enquanto suas respectivas áreas são dadas pela ITAIPU BINACIONAL (1994), o que permite um cálculo da área construída, como apresentado na Tabela D.01.

Tabela D.01- Casas construídas nos conjuntos habitacionais de Itaipu em território brasileiro (ITAIPU BINACIONAL, 1994; THEMAG, 1982).

Tipo de casa	Área individual (m ²)	Quantidade	Área Total (m ²)
1	250	22	5.500
2	210	52	10.920
3	190	378	71.820
4	120	514	61.680
5	90	136	12.240
6	80	396	31.680
7	70	391	27.370
8	80	225	18.000
9	70	212	14.840
Múltiplo	70	2.900	203.000
TOTAL		5.226	457.050

(*) Usando o valor médio, de 70 m² por casa.

Em território paraguaio não se obtiveram as áreas das residências, apenas a quantidade de casas para cada tipo (THEMAG, 1982). Aplicando no entanto as áreas

dadas para cada tipo no Brasil (ITAIPU BINACIONAL, 1994), pode-se calcular a área construída como apresentado na Tabela D.02.

Tabela D.02- Casas construídas nos conjuntos habitacionais de Itaipu em território paraguaio (ITAIPU BINACIONAL, 1994; THEMAG, 1982.)

Tipo de casa	Área individual (m ²)	Quantidade	Área Total (m ²)
1	250	20	5000
2	210	41	8610
3	190	202	38380
4	120	370	44400
5	90	139	12510
6	80	476	38080
7	70	321	22470
8	80	581	46480
9	70	459	32130
Multifuncional	70	1.680	117600
Soma		4.289	365.660

Somando estes dois valores, obtém-se uma estimativa total de 822.710 m² de área construída nos alojamentos e casas de Itaipu.

D.1.2 Obras de Infra-estrutura nos conjuntos habitacionais

Os conjuntos habitacionais possuíam diversas benfeitorias, que permitiam a realização de atividades fundamentais à população residente, como educação, saúde, abastecimento e lazer. Estas construções são listadas a seguir:

a. educação:

- 9 escolas, com área construída de 32.000 m² (THEMAG, 1982);
- dados da REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1979):
 - em território brasileiro:
 - conjunto C: escola de 1º grau para 5.000 alunos (60 salas de madeira- 5.096m² de área construída);
 - conjunto A: escola: 9.317m² de alvenaria e 2.986m² em madeira;
 - em território paraguaio:
 - área 1: uma escola de 500 m²;
 - área 3: uma escola de 1.500m²;
 - área 4: uma escola, 3.200m²;

- área 5: uma escola, 2.000m²;
 - área 7: uma escola, 2.500m²;
- (são sete escolas, somando 27.000 m²)
- b. saúde:
- 8 ambulatórios, com 50 leitos, para atendimento emergencial (THEMAG, 1982);
 - REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979:
 - Brasil, cj C: ambulatório: 2.500 m²;
 - Brasil, cj A: ambulatório e hospital: ~10.000 m²;
 - 2 maternidades;
 - 2 hospitais completos, com 300 leitos no total;
 - no Paraguai um hospital na área 2.
 - no Brasil: hospital Costa Cavalcanti (Jornal de Itaipu, 2001):
 - área construída foi ampliada em 2001, de 11.500 m² (110 leitos) para 15.000 m² (180 leitos), se tornando um centro de referência em diversas especialidades;
 - em 1996 iniciou atendimento ao SUS;
 - evolução de atendimentos: conforme Tabela D.03.

Tabela D.03- Evolução dos atendimentos médicos no Hospital Costa Cavalcanti (Jornal de Itaipu, 2001).

	Internações/ dia	Proc. Cirúrgicos/ ano	Consultas/ ano
1995	17	1.400	51.739
2000	75	6.376	88.214

- c. utilidades
- no Brasil, todas as casas das vilas A e B possuíam ligação de água, energia e esgoto à rede (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979; Jornal de Itaipu, 2001):
 - água: 2.426 ligações água- 5.900m de rede;
 - ETA II: ME, atualmente com aproximadamente 350 m³/dia, sendo que nas obras chegou a 250 m³/ h;
 - esgoto: 2.426 ligações esgoto- 62.000m de rede;
 - estação de tratamento de esgotos, com 250 m³/h de capacidade;

- eletricidade: interligação elétrica às redes do Brasil (de FURNAS, em Foz do Iguaçu) e do Paraguai (da ANDE, em Ciudad del Este);
- telecomunicações: no Brasil pela rede da TELEPAR e no Paraguai pela rede da ANTELCO;

d. atividades sociais

De acordo com ITAIPU BINACIONAL (1994), além das estruturas mencionadas anteriormente, podemos dizer que nos conjuntos habitacionais haviam:

- 4 igrejas (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979):
 - Brasil, cj A: igreja 280 m²;
 - Paraguai, área 2: Igreja, 280m²;
- 3 centros comerciais, com área de 4.125 m²;
- 3 supermercados, com área de 3.200 m²;
- 3 clubes, com área de 7.200 m²;
- 2 centros executivos, com área de 4.700 m²;
- 2 cine-teatros, com área de 800 m² e capacidade de 700 lugares;
- além destes: salões de estar com 40 TV's, salões de recreação, campos de futebol, quadras, raias de atletismo, canchas de bocha, piscinas, ginásio, agências bancárias e de turismo;

D.1.3 Obras de acesso ao canteiro de obras

De modo a permitir o acesso de mão de obra e materiais para o canteiro de obras de Itaipu, a empresa teve de implementar novos acessos, e melhorar a estrutura viária existente na região. As principais obras neste sentido foram (ITAIPU BINACIONAL, 1994):

- estrada Foz- Canteiro: construção de estrada de 10 km de extensão, com pista dupla asfaltada e 4 pontes;
- estrada Porto Presidente Franco- Canteiro: construção de estrada de 27 km de extensão, com pista dupla, passando por Hernandarias e Cid. Pres. Stroessner;
- estrada de transbordo na margem direita (Paraguai): estrada de 153 km, desde Hernandarias até 65 km antes de Salto de Guaíra;

Além disso nas vilas A, B e C foram construídos 10 km de estrada de pista dupla, e 100 km de pavimentação interna (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979).

D.1.4 Alteração das características das cidades vizinhas à obra.

A obra de Itaipu trouxe à região de Foz um enorme contingente populacional, como já apontado anteriormente. Além da população residente, um enorme número de pessoas constituía à época um contingente transitório, que incluía desde motoristas dos caminhões de transporte de materiais que passavam pela região até profissionais de empresas prestadoras de serviços temporários em trânsito.

Esta mobilização acabou por alavancar o crescimento das cidades da região, principalmente Foz do Iguaçu e Ciudad Presidente Stroessner. A seguir apresenta-se, a título de complementação apenas, alguns indicadores deste crescimento regional.

Para a cidade de Foz do Iguaçu, temos os dados apresentados na Tabela D.04 (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979).

Tabela D04- Indicadores sócio econômicos de Foz do Iguaçu, antes e durante a obra de Itaipu (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979)

Indicador	1974	1979
População (hab.)	34.000	150.000
Estabelecimentos Comerciais	-	1.533
Ligações de esgoto à rede coletora	485	2,401
Extensão rede coletora esgoto (m)	11.800	86.584
Extensão rede distribuição água (m)	26.850	118.000
Extensão rede captação pluvial (m)	170	19.000
Extensão de rios canalizados (m)	30	2,600
Consumo elétrico (kWh/ ano)	8.800.000	25.000.000
Quantidade de linhas telefônicas	300	3.000
Área pavimentada (m ²)	36.000	1.200.000
Bancos	-	12
Hospitais	3	8
Escolas	-	69

Já para as cidades de Pres. Stroessner e Hernanderias, temos os dados apresentados na Tabela D.05 (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979).

**Tabela D.05- Indicadores sócio econômicos de Ciudad Pres. Stroessner e
Hernanderias, antes e durante a obra de Itaipu (REVISTA CONSTRUÇÃO
PESADA, 1979)**

Indicador	1974	1979
População (hab.)	20.000/ 15.000	60.000/ 70.000
Estabelecimentos Comerciais	387	1.085
Bancos	4	13
Estabelecimentos industriais	12	81
Escolas secundárias	233	2.040

D.1.5 Alimentação na obra.

De acordo com THEMAG (1982), na área da obra haviam dois refeitórios, um com capacidade de 1.360 pessoas (8.000 m²) na margem esquerda, e outro com 1.220 pessoas (7.600 m²) na margem direita.

De acordo com o JORNAL DE ITAIPU (2001), nestes refeitórios havia um consumo mensal de aproximadamente 810 t de alimentos, sendo que no pico de produção de concreto atingiu-se 1,3 milhões de refeições por mês. Embora este aspecto não seja computado neste estudo, deve-se ressaltar que é um importante item de consumo na obra, e que talvez mereça alguma atenção em futuros estudos.

Apenas para completar a informação, THEMAG (1982) apresenta alguns dados sobre estas refeições, que são transcritos na Tabela D.06.

Tabela D.06- Dados de refeições em Itaipu (THEMAG, 1982).

	Jun. 1978	Mar. 1982
Arroz (kg)	142.000	82.000
Carne (kg)	150.000	107.000
Pão (kg)	91.000	57.000
Feijão (kg)	39.000	31.000
Óleo de soja (kg)	24.000	16.000
Leite (kg)	198.000	70.000
Hoti-fruti-granj. (kg)	285.000	20.500
n. refeições	991.000	582.000
n. cafês	225.000	139.000
n. lanches	288.000	175.000

D.1.6 Estimativa do consumo das obras dos conjuntos habitacionais

Uma vez que não foram encontrados dados para estimar com precisão os consumos das obras de infra-estrutura, decidiu-se realizar uma aproximação inicial, mesmo que grosseira, verificando com dados superestimados a contribuição desta parte da obra para os consumos totais. Caso esta se mostrasse relevante, proceder-se-ia então ao levantamento de maiores informações para cálculos mais ajustados à realidade.

Desta forma, consultou-se o prof. Vanderley John, do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da USP (JOHN, 2003), que afirmou que pode-se fazer uma primeira estimativa de peso dos materiais de construção usando o valor de 80 kg/ m² de área construída, sendo este valor em si já superestimado.

Considerando que nos conjuntos habitacionais temos uma área construída de cerca de 822,7 mil m², e que além desta área há clubes, supermercados, igrejas, escolas, etc, tomemos como primeira aproximação o valor de 1,0.10⁶ m² de área construída. Usando o dados anterior, de 80 kg/ m² de área construída, temos um total de 80.000 t de materiais de construção nos conjuntos habitacionais.

Tendo em vista o volume do concreto utilizado na barragem, 12,6.10⁶ m³, e admitindo uma densidade aproximada de 2,4 t/m³ para o concreto (JOHN, 2003), temos que na obra foram usados cerca de 30,0 .10⁶ t de concreto. Desta forma, o estimado para os conjuntos habitacionais representa aproximadamente 0,27% do peso do concreto usado em Itaipu.

Além disso, há que se considerar que o uso da infra-estrutura ocorreu durante 14 anos para a obra, sendo a partir de então passado ao município. Se considerarmos um período de análise de 100 anos, devemos alocar as cargas ambientais dos conjuntos habitacionais aplicando um fator multiplicativo de 0,14, o que torna ainda menor a contribuição das obras de infra-estrutura.

Deste modo, embora considere-se que houveram grandes obras para o estabelecimento da infra-estrutura de Itaipu, não será incluído neste estudo nenhum aspecto ambiental relativo a esta parte das obras.

D.2 Transporte de operários

Segundo estimativas da própria empresa (ITAIPU BINACIONAL, 1994), na obra de Itaipu chegou-se a ter quase 30.000 pessoas trabalhando, 24h por dia. Considerando que muitas delas viviam em casas e alojamentos distantes do canteiro, e que trabalhavam seis dias por semana, indo e voltando ao menos uma vez por dia, é de se esperar que grande quantidade de viagens de ônibus tenham sido executadas para a realização da obra. Nesta parte do Anexo busca-se estimar os aspectos ambientais relativos a este transporte, calculando a distância total percorrida pelos ônibus para posterior aplicação de um modelo de transporte de ônibus com os aspectos

calculados por quilômetro rodado, uma vez que ao contrário do transporte de cargas não é possível utilizar as estimativas por t.km.

Para estimar estes valores, baseou-se os cálculos em dados de população envolvida na obra, de 1974 a 1986- anos de execução das obras civis. De posse destes dados admitiu-se que o meio de transporte utilizado eram ônibus semelhantes aos de transporte urbano, de 46 lugares, e que toda a população envolvida era transportada nestes. Para cada ano utilizou-se o valor de 52 semanas de trabalho, com seis dias trabalhados por semana. Por último, calculou-se as distâncias percorridas, por meio de informações bibliográficas sobre a localização dos alojamentos.

Como primeiro passo para estimar o consumo e as emissões do transporte do pessoal da obra, levantou-se dos relatórios anuais da empresa, a quantidade de indivíduos vinculados à obra ano a ano (ITAIPU BINACIONAL, 1977; 1978; 1979; 1980; 1981a; 1982; 1983; 1984; 1985; 1987), sendo que as estimativas encontram-se consolidadas na última edição localizada (ITAIPU BINACIONAL, 1987). Estes dados são apresentados na Tabela D.07.

Tabela D.07 – Quantidade de pessoas vinculadas à obra (ITAIPU BINACIONAL, 1987)

Ano	N. Pessoas Vinculados
1974	596
1975	5.737
1976	13.406
1977	22.485
1978	31.318
1979	26.604
1980	24.758
1981	27.916
1982	19.221
1983	12.455
1984	10.307
1985	10.374
1986	13.371

De posse destes dados levantou-se a distribuição desses indivíduos pelos diferentes alojamentos existentes no local. A quantidade de casas em cada área no Brasil e no Paraguai são respectivamente apresentadas nas Tabelas D.08 e D.09, a seguir.

Tabela D.08- Distribuição, por tipo, das casas construídas nos conjuntos habitacionais de Itaipu em território brasileiro (ITAIPU BINACIONAL, 1994; THEMAG, 1982).

Tipo de Casa	Quantidade	%
1	22	0,42
2	52	1,00
3	378	7,23
4	514	9,84
5	136	2,60
6	396	7,58
7	391	7,48
8	225	4,31
9	212	4,06
Multifuncional	2.900	55,49
Soma	5.226	100,00

Tabela D.09- Distribuição, por tipo, das casas construídas nos conjuntos habitacionais de Itaipu em território paraguaio (ITAIPU BINACIONAL, 1994; THEMAG, 1982).

Tipo de Casa	Quantidade	%
1	20	0,47
2	41	0,96
3	202	4,71
4	370	8,63
5	139	3,24
6	476	11,10
7	321	7,48
8	581	13,55
9	459	10,70
Multifuncional	1.680	39,17
Soma	4.289	100,00

Tendo esta distribuição, estimou-se a distância de cada área até o canteiro de obras, a partir de dados numéricos e mapas disponíveis na literatura (ITAIPU BINACIONAL, 1994; REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979). Estas informações são apresentadas na Tabela D.10.

Tabela D.10- Distância estimada dos alojamentos até o canteiro de obras (ITAIPU BINACIONAL, 1994; REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1979).

Brasil	
Casas tipo 1, 2 e 3	Distantes 14 km da obra.
Casa tipo 4, 5, 6, 7, 8 e 9	Distantes cerca de 10 km até a obra.
Alojamento Multifuncional	No canteiro- cerca de 5 km até a obra.
Paraguai	
Casas tipo 1, 2, 3, 4 e 8	Distantes cerca de 25 km da obra.
Casas tipo 5	Distante cerca de 27 km da obra.
Casas tipo 6, 7 e 9	Distante cerca de 15 km da obra.
Alojamento Multifuncional	No canteiro- cerca de 2 km da obra.

Como se pode notar, os dados acima não permitem a alocação dos envolvidos pelos diferentes locais de alojamento, apenas dão informações sobre a distância destes para com a obra. Desta forma, decidiu-se admitir duas hipóteses simplificadoras:

- a divisão dos envolvidos entre Brasil e Paraguai obedeceu, durante toda a obra a proporção dada pelos valores apontados por THEMAG (1982), de 21.000 pessoas na parte brasileira e 15.000 na parte paraguaia (relação 7 para 5);
- em cada país a distribuição de envolvidos por área obedece a quantidade de casas por área.

Usando estas hipóteses, é possível aglutinar os percentuais do pessoal da obra entre as diferentes distâncias a percorrer. Para tanto, calcula-se o percentual em cada país das casas por cada diferente distância, e posteriormente se faz a ponderação dos percentuais pela relação 7:5, ou seja, multiplicando os resultados no caso do Brasil por (7/12) e no caso do Paraguai por (5/12).

Realizando este procedimento, temos os valores apresentados na Tabela D.11.

Tabela D.11- Distribuição, por distância, das casas construídas nos conjuntos habitacionais de Itaipu.

Distância (km)	Tipo	% das casas em cada país	% total
	Brasil		
14	Casas tipo 1, 2 e 3	8,65	5,05
10	Casa tipo 4, 5, 6, 7, 8 e 9	36	20,92
5	Alojamento Multifuncional	55,49	32,37
	Paraguai		
25	Casas tipo 1, 2, 3, 4 e 8	28,30	11,79
27	Casas tipo 5	3,24	1,35
15	Casas tipo 6, 7 e 9	29,28	12,20
2	Alojamento Multifuncional	39,17	16,32

Aplicando estas proporções ao número de envolvidos anualmente, podemos estimar o número de pessoas a transportar por ano para cada distância, como mostra a Tabela D.12.

Tabela D.12- Quantidade de pessoas a transportar anualmente, entre os conjuntos habitacionais e a obra de Itaipu, por distância.

Ano	Total Pessoas	N. Pessoas Vinculados						
		p/ 27 km	p/ 25 km	p/ 15 km	p/ 14 km	p/ 10 km	p/ 5km	p/ 2km
1974	596	8,05	70,29	72,72	30,07	124,67	192,93	97,27
1975	5.737	77,47	676,61	700,01	289,45	1200,06	1857,08	936,33
1976	13.406	181,03	1581,07	1635,77	676,37	2804,25	4339,55	2187,97
1977	22.485	303,63	2651,82	2743,56	1134,43	4703,38	7278,44	3669,74
1978	31.318	422,90	3693,56	3821,35	1580,08	6551,05	10137,70	5111,35
1979	26.604	359,25	3137,61	3246,16	1342,25	5564,98	8611,77	4341,99
1980	24.758	334,32	2919,89	3020,91	1249,11	5178,84	8014,21	4040,71
1981	27.916	376,96	3292,34	3406,24	1408,44	5839,43	9036,47	4556,12
1982	19.221	259,55	2266,87	2345,30	969,75	4020,62	6221,88	3137,02
1983	12.455	168,19	1468,91	1519,73	628,39	2605,32	4031,71	2032,76
1984	10.307	139,18	1215,58	1257,64	520,02	2156,00	3336,40	1682,19
1985	10.374	140,09	1223,48	1265,81	523,40	2170,02	3358,08	1693,12
1986	13.371	180,56	1576,94	1631,50	674,61	2796,93	4328,22	2182,26

Para estimar a quantidade de viagens de ônibus utilizados para as pessoas em cada distância, fez-se as seguintes hipóteses:

- cada pessoa trabalhava 6 dias por semana, 52 semanas ao ano;
- cada ônibus comporta 46 passageiros;
- não há paradas, ou seja, desconsidera-se o fato de que em muitos casos é mais simples desviar um ônibus em alguns quilômetros do que ter um ônibus alocado para um número muito reduzido de pessoas, e
- como todos tem que ir e voltar, o número de viagens sempre deve ser par.

Aplicando estas hipóteses, podemos estimar o número de viagens para cada distância, em cada ano. Os valores obtidos são apresentados na Tabela D.13.

Tabela D.13- Número de viagens de ônibus entre os conjuntos habitacionais e a obra de Itaipu, para cada distância, em cada ano.

Ano	N. Viagens de Ônibus/ ano						
	p/ 27 km	p/ 25 km	p/ 15 km	p/ 14 km	p/ 10 km	p/ 5km	p/ 2km
1974	624	624	624	624	1248	1872	1248
1975	624	4992	4992	2496	8736	13104	6864
1976	1248	11232	11232	4992	19344	29952	14976
1977	2496	18096	18720	8112	32448	49920	24960
1978	3120	25584	26208	11232	44928	69264	34944
1979	2496	21840	22464	9360	38064	58656	29952
1980	2496	19968	20592	8736	35568	54912	27456
1981	3120	22464	23712	9984	39936	61776	31200
1982	1872	15600	16224	6864	27456	42432	21840
1983	1248	9984	10608	4368	18096	27456	14352
1984	1248	8736	8736	3744	14976	23088	11856
1985	1248	8736	8736	3744	14976	23088	11856
1986	1248	11232	11232	4992	19344	29952	14976

Em último lugar, multiplicam-se os números de viagens obtidos na Tabela D.13 pelas extensões de cada distância apontada, resultando na distância percorrida anualmente, apresentada na Tabela D.14.

Tabela D.14– Distâncias percorridas para o transporte de operários entre os conjuntos habitacionais e a obra de Itaipu, por ano.

Ano	km percorridos/ ano							SOMA
	p/ 27 km	p/ 25 km	p/ 15 km	p/ 14 km	p/ 10 km	p/ 5km	p/ 2km	
1974	16.848	15.600	9.360	8.736	12.480	9.360	2.496	74.880
1975	16.848	124.800	74.880	34.944	87.360	65.520	13.728	418.080
1976	33.696	280.800	168.480	69.888	193.440	149.760	29.952	926.016
1977	67.392	452.400	280.800	113.568	324.480	249.600	49.920	1.538.160
1978	84.240	639.600	393.120	157.248	449.280	346.320	69.888	2.139.696
1979	67.392	546.000	336.960	131.040	380.640	293.280	59.904	1.815.216
1980	67.392	499.200	308.880	122.304	355.680	274.560	54.912	1.682.928
1981	84.240	561.600	355.680	139.776	399.360	308.880	62.400	1.911.936
1982	50.544	390.000	243.360	96.096	274.560	212.160	43.680	1.310.400
1983	33.696	249.600	159.120	61.152	180.960	137.280	28.704	850.512
1984	33.696	218.400	131.040	52.416	149.760	115.440	23.712	724.464
1985	33.696	218.400	131.040	52.416	149.760	115.440	23.712	724.464
1986	33.696	280.800	168.480	69.888	193.440	149.760	29.952	926.016
TOTAL								15.042.768

Desta forma, estima-se que ao longo da obra foram percorridos um total de 15.042.768 km por meio de ônibus. Este valor será aproximado para $15,0 \cdot 10^6$ km, e assim como as distâncias médias de transporte de insumos calculadas neste Anexo, será aplicado aos modelos de consumo e emissões dos processos de transporte, que serão descritos no Anexo E.

D.3 Escavações e Obras de Terra

Como já observado no Anexo C- Características da Usina de Itaipu, para a construção da usina foram realizados extensos trabalhos de escavação e movimentação de terra, incluindo o desvio do rio, a construção de ensecadeiras e das barragens permanentes de terra e enrocamento.

Tendo em vista a experiência internacional, citada já no Capítulo 3.3 do texto principal, referente à revisão bibliográfica de uso de ACV em sistemas energéticos, em geral nos casos de ICVs de hidrelétricas estima-se o consumo de combustível e as correspondentes emissões atmosféricas deste tipo de obras. Estes fluxos, de

combustível e emissões atmosféricas, foram neste trabalho agrupados num processo denominado “operação das máquinas de construção”.

Além destas estimativas, no caso deste trabalho foram levantadas as quantidades de rocha e solo movimentadas. Uma vez que estes materiais foram utilizados pela obra, será admitido que estas quantidades referem-se à consumos de rocha e solo, caracterizados aqui como aspectos ambientais, respectivamente nomeados como consumo de “basalto” e “terra”, para fins de consolidação do ICV.

Além disso foi conduzida uma estimativa superficial para avaliação da necessidade de incluir o uso de explosivos.

D.3.1 Consumo de rocha e terra

De acordo com informações da própria empresa (ITAIPU BINACIONAL, 1994), o volume total de rocha escavada foi de $32,0.10^6 \text{ m}^3$. Será considerado que toda esta rocha foi utilizada na construção da usina.

Cabe dizer que a rocha utilizada para produção do concreto foi britada em 4 tamanhos distintos de brita, além da obtenção de areia artificial. Estes tamanhos são (ITAIPU BINACIONAL, 1994):

- agregado 1: MSA 19mm;
- agregado 2: MSA 38 mm;
- agregado 3: MSA 76 mm;
- agregado 4: MSA 152 mm;

(*) MSA = *Maximum Size of Agregate*, tamanho máximo de agregado;

De modo a registrar a quantidade de cada um destes tamanhos obtidos para a rocha beneficiada, podemos apresentar os seguintes valores, obtidos junto à empresa (MESCOLIN, 2002):

- areia artificial = 5.792.736.254,00 kg ou $3.597.972,828 \text{ m}^3$;
- brita 1 = 7.716.884.220,00 kg ou $4.884.103,936 \text{ m}^3$;
- brita 2 = 4.596.625.138,50 kg ou $3.105.827,796 \text{ m}^3$;
- brita 3 = 3.579.481.840,50 kg ou $2.468.608,165 \text{ m}^3$;
- brita 4 = 2.821.102.961,00 kg ou $2.015.073,543 \text{ m}^3$;

Além deste consumo de rocha, temos um total de $23,6.10^6\text{m}^3$ de terra escavada, de acordo com a empresa (ITAIPU BINACIONAL, 2002). Embora segundo a literatura (ITAIPU BINACIONAL, 1994) o consumo de terra tenha sido de apenas $16,7.10^6\text{m}^3$, consideraremos o valor total escavado como consumido, uma vez que toda esta quantidade foi retirada do solo para que a usina pudesse ser construída.

D.3.2 Explosivos

Na obra de Itaipu utilizou-se explosivos para as escavações em rocha e obras de desvio do rio. Embora não hajam dados diretos, segundo informações da empresa (MESCOLIN, 2002), pode-se estimar seu consumo com o valor médio aproximado de $0,4\text{ kg/m}^3$ de rocha escavada, o que resulta em 12.640 t de explosivos para o volume de rocha escavado. Uma vez que esta quantidade se apresenta como muito reduzida frente às demais do estudo, decidiu-se por considerar que a contribuição dos explosivos é desprezível.

Esta afirmação no entanto deve ser observada com ressalvas. Embora o valor da massa dos explosivos seja desprezível, há uma possibilidade que deve ser avaliada de que hajam processos ambientalmente relevantes nos processos de obtenção deste explosivo. Além disso, há que se considerar a grande quantidade de material particulado emitido no seu uso, o que não foi quantificado.

Embora se acredite que estes aspectos não se mostrarão significativos, recomenda-se que em estudos posteriores esta hipótese seja verificada com cuidado.

D.3.3 Operação das máquinas de construção

Tendo em vista a duração e porte das obras de escavação e movimentação de terra em Itaipu, e a experiência internacional em ICVs de usinas hidrelétricas, considerou-se relevante estimar as quantidades de combustível consumido nas obras de terra, e suas respectivas emissões.

Para realização destas estimativas foram utilizados fatores de emissão e de consumo de combustível, retirados da literatura e aplicados sobre estimativas de potência dos equipamentos utilizados. Este procedimento, cabe destacar, é o usualmente adotado para estimativas desta natureza, e foi também utilizado para as diversas modalidades de transporte deste estudo, descritas no Anexo E. Assim, as observações aqui

realizadas referentes ao uso destes fatores, valem tanto para as emissões das máquinas de construção como para as etapas de transporte.

Os fatores de emissão e consumo utilizados no caso das máquinas de construção foram retirados da compilação usualmente referida como AP-42, da Environmental Protection Agency dos EUA (ESTADOS UNIDOS, 1985a, 1985b). Os fatores dos modelos de transporte são apresentados no Anexo E.

Cabe destacar que embora haja versões atualizadas dos fatores de EPA, buscou-se trabalhar com dados da época, obtidos de ensaios dos equipamentos disponíveis que, senão idênticos, eram bastante semelhantes aos encontrados nos canteiros de Itaipu. Para tanto, obteve-se uma cópia das tabelas referentes às emissões de equipamentos de construção pesada da versão de 1985 deste documento (ESTADOS UNIDOS, 1985a).

Exceção a esta referência foi o fator de emissão de CO₂, para o qual esta edição da AP-42 não fornece valores. No entanto, segundo consultas a Renato Linke e Wagner Costa, especialistas em emissões veiculares da CETESB (LINKE; COSTA, 2003), as emissões deste gás são as únicas para as quais há possibilidade direta de correlação com o consumo de combustível, por estarem diretamente relacionados à eficiência da combustão para cada classe de motores. Desta forma, consultou-se um documento disponibilizado pela CETESB (ALVARES, LINKE, 2003) que apresenta este valor para veículos diesel pesados.

São apresentados a seguir o detalhamento da metodologia utilizada, as estimativas adotadas e os resultados obtidos.

a. Metodologia utilizada

A referência utilizada neste caso (ESTADOS UNIDOS, 1985a) apresenta os fatores de emissão em três formatos: emissão por tempo de funcionamento (g/h e lb/h), emissão por energia consumida (g/HP.h e g/kWh) e emissão por consumo de combustível (lb/10³ gal e kg/m³).

Embora a referência aponte que os fatores mais confiáveis, medidos de fato, sejam os dados em função da energia, devido à ausência de dados quer sobre o consumo específico de cada tipo de máquina, quer sobre a sua taxa de utilização em horas de funcionamento, foram estabelecidas certas hipóteses que, embora agreguem

incertezas aos resultados, permitiram os cálculos nas condições atuais de disponibilidade de informações. Futuramente, na existência de dados mais detalhados sobre o uso dos equipamentos no canteiro, pode-se refinar esta estimativa aplicando fatores com menor quantidade de aproximações.

Para as máquinas de construção, basicamente o procedimento adotado consistiu das seguintes etapas:

1. obteve-se na literatura uma estimativa do consumo total de diesel na obra;
2. levantou-se a relação dos equipamentos de construção utilizados;
3. foi pesquisada na literatura a potência para cada equipamento;
4. obteve-se o total da potência nos equipamentos, somando o produto da quantidade de cada equipamento por sua potência individual;
5. calculou-se a participação percentual de cada tipo de equipamento na potência total;
6. distribuiu-se o total de combustível consumido entre os tipos de equipamento, proporcionalmente ao percentual da potência total referente a cada um;
7. aplicou-se os fatores de emissão em função do consumo, para obter-se as emissões em gramas de cada substância considerada para toda a operação das máquinas de construção.

b. Sobre as hipóteses assumidas nesta metodologia

A primeira hipótese admitida foi a de aplicar todos os equipamentos a mesma taxa de utilização. Esta hipótese, de acordo com o Eng. Francisco Andriolo, consultor de construção de barragens e participante da obra de Itaipu (ANDRIOLO, 2002), não oferece grandes desvios da realidade, uma vez que a maior parte dos equipamentos, principalmente os de maior potência, trabalharam com uma taxa de uso de cerca de 425 horas/ mês, muito acima do usual, e semelhante para praticamente todos os equipamentos.

Outra consideração importante é o uso de fatores de emissão sobre consumo de diesel e emissão de poluentes. De acordo com a própria EPA (ESTADOS UNIDOS, 1985a) os fatores de emissão mais adequados são aqueles dados em g/HP.h, que pressupõe o conhecimento das horas de funcionamento de cada equipamento. Para

atingir os fatores em $\text{g}/10^3$ litros de combustível, que serão aqueles utilizados neste trabalho, aplica-se um consumo padronizado em função da potência.

Pesquisando nas bases de informações da EPA encontrou-se uma referência (ESTADOS UNIDOS, 1998) onde é dada a seguinte estimativa do consumo de diesel para equipamentos de construção civil:

- equipamentos até 100 HP: 0,408 lbs/HP.h, e
- equipamentos acima de 100 HP: 0,367 lbs/ HP.h.

De modo a verificar a validade do uso dos fatores de emissão sobre consumo, procedeu-se a um cálculo por meio dos seguintes passos:

1. aplicou-se o consumo médio estimado para cada tipo de equipamento (ESTADOS UNIDOS, 1998), dividindo-se, para cada fator apresentado para cada tipo de veículo e cada poluente, o valor dado em tempo (g/h) pelo valor dado em consumo (kg/m^3), chegando a valores de consumo em m^3/h ;
2. fez-se a média dos consumos calculados desta forma para cada tipo de equipamento, calculando a média entre os seis valores, um para cada poluente;
3. calculou-se o desvio de cada valor para média, e eliminou-se os valores cujo desvio foi maior que 10%;
4. recalculou-se a média, obtendo uma média corrigida dos consumos para cada tipo de equipamentos;
5. estimou-se a potência média de cada dado, dividindo, para cada fator apresentado para cada tipo de veículo e cada poluente, o valor dado em tempo (g/h) pelo valor dado em energia (g/HP.h), chegando a valores em HP;
6. procedeu-se do mesmo modo para o consumo, obtendo-se e corrigindo-se a média das potências para cada tipo de equipamento;
7. aplicou-se os valores de consumo por faixa de potência dados pela EPA (ESTADOS UNIDOS, 1998), utilizando para isso os valores das potências médias corrigidas, obtidas no passo 6, e
8. comparou-se os valores de consumo (em kg/m^3) do item 4 com os obtidos no passo 7, calculando o erro.

Esta operação apresentou erros bastante reduzidos, sendo os resultados reportados na Tabela D.15.

Tabela D.15- Verificação da estimativa de consumo de diesel.

Veículo	Potência (HP) -passo 6-	Consumo (l/h) -passo 4-	Consumo (l/h) -passo 7-	Erro (%)
Trator esteira	73,15	16,69	16,20	2,92
Trator rodas	48,23	11,00	10,68	2,90
Dozer	183,03	42,46	36,46	14,13
Scraper	232,78	56,13	46,37	17,39
Motoniveladora	45,80	10,75	10,14	5,67
Carregadeira	96,33	22,06	21,33	3,28
Carregadeira esteira	40,24	9,17	8,91	2,86
Caminhão off-road	232,33	55,04	46,28	15,93
Roller	30,33	8,15	6,72	17,60
Micelânea	68,82	17,19	15,24	11,36

Estes cálculos mostram que, embora alguns valores apresentem erros acima de 10% em alguns casos, a estimativa apresenta consistência dentro da qualidade dos dados existentes.

Na verdade é importante que se saliente o fato de que o uso de fatores de emissão é em si uma atividade de certa complexidade e incerteza, uma vez que não apenas as medições empíricas possuem fontes de desvios da realidade, mas tanto o consumo como as emissões dependem de uma série de fatores que variam entre equipamentos de mesmo modelo, entre um dia e outro de funcionamento, etc. Exemplos destas variáveis das quais as emissões dependem são: qualidade do combustível, regulagem do motor, desgaste do equipamento, modo de dirigibilidade, tipo de esforço ao qual o equipamento está submetido, temperatura ambiente, etc. De acordo com os especialistas consultados (LINKE, COSTA, 2003), o consumo de combustível em função da potência (g combustível/ kWh) varia muito entre tipos de motor, e dificilmente é possível estabelecer correlações entre emissões e consumos, exceção feita ao caso do CO₂. Isso ocorre, entre outros motivos, porque o consumo de combustível (litros/h) e conseqüentemente as emissões de poluentes (g/h) variam muito com a potência.

Além disso, segundo os especialistas, há uma dificuldade muito grande de determinar as condições de operação que serão consideradas. A cada ponto da curva de potência, os motores apresentam diferentes características de consumo e emissões, e os testes de bancada realizados seguem diferentes modelos de medição e condições operacionais para estimar estes valores, podendo conduzir a resultados bastante díspares para um mesmo motor.

De modo a ilustrar estas observações sobre a variação do consumo e das emissões com o modo de operar os veículos, na Figura D.01 é apresentado um gráfico com alguns resultados de um ensaio para um motor diesel realizado no laboratório da CETESB (CETESB, 2003), de acordo com a metodologia conhecida como “13 pontos”, que mede os parâmetros em 13 pontos da curva de torque do motor ensaiado em bancada.

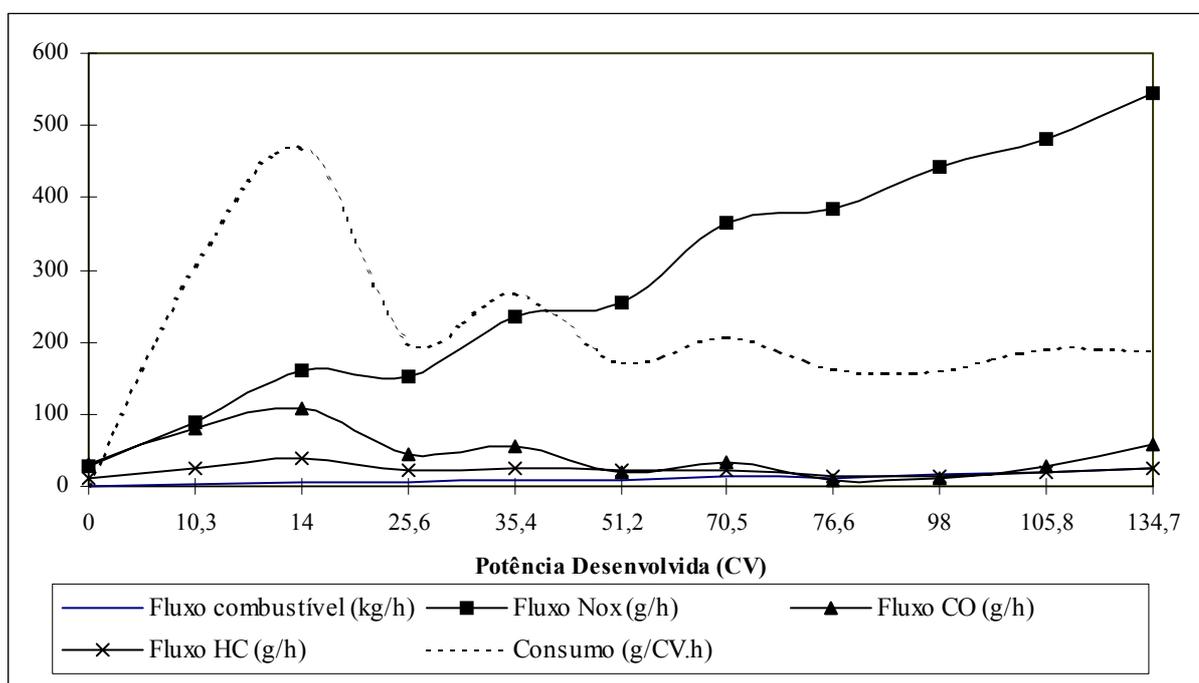


Figura D.01 – Variação de parâmetros de consumo e emissão em função da potência desenvolvida, para motor a diesel específico (elaborado a partir de dados de CETESB, 2003).

c. Cálculo das emissões

O primeiro dado obtido para a estimativa das emissões é o consumo de diesel pelas máquinas de construção, estimado por CAVALCANTI (1979) em 295 mil toneladas, para toda a obra. Uma vez que os fatores de emissão trabalham com o consumo por volume de combustível, decidiu-se utilizar a densidade do diesel estimada por ALVARES JR.; LINKE (2003), de valor médio de $0,85 \text{ t/m}^3$. Desta forma, temos como dado inicial o consumo de 347.059 m^3 de diesel consumido nas obras de Itaipu.

Da literatura publicada pela empresa foi obtida a relação de equipamentos de construção civil utilizados na obra (ITAIPU BINACIONAL, 1981c), e levantou-se a potência de cada uma das máquinas individualmente utilizando diversas fontes (ANASTÁCIO, 2003; ATLAS COPCO, 2003; BÖRNKE, 2003; CATERPILLAR, 2003; EDIECAST, 2003; INGERSOLL-RAND, 2003; QUINTAES, 2003; REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1980; 1981; 1982; SCANIA, 2003; TEREX, 2003).

Realizando o produto da quantidade de cada equipamento por sua potência unitária, obteve-se ao chamada “potência acumulada”, de onde se obteve o percentual de contribuição por tipo de máquina utilizada- soma das contribuições dos equipamentos semelhantes, chamado de “% por categoria”.

Esta contribuição foi utilizada então para alocar proporcionalmente a cada tipo de equipamento uma parcela do consumo total de diesel na obra, determinando o “consumo da categoria”, em toneladas e m³ de diesel.

A lista de equipamentos, suas potências e os cálculos subsequentes, descritos anteriormente, são apresentados na D.16, a seguir.

Tabela D.16– Dados dos equipamentos e estimativas de consumo.

Tipo	Descrição	Quant.	Potência unitária (HP)	Pot acumulada (HP)	% da Potência Total	% por categoria	Consumo (t)	Consumo Categoria (t)	Consumo (m3)
Escavadeiras	Elétrica, Bucyrus-Erie-195-B, 10m3	4		0	0,00%	0,02	0,00	5.472,31	0,00
	Sobre esteiras, O&K-RH-75, 7,5 m3	4	583	2332	1,42%		4.186,82		4.925,67
	Sobre esteiras, O&K-RH-25, 2,5 m3	2	358	716	0,44%		1.285,49		1.512,34
Carregadeiras	Sobre pneus, Caterpillar-992, 10m3	8	880	7040	4,28%	0,07	12.639,45	21.939,49	14.869,94
	Sobre pneus, Caterpillar-988, 5,5 m3	5	520	2600	1,58%		4.667,98		5.491,74
Carregadeiras	Sobre pneus, Caterpillar-988B, 7,5 m3	3	520	1560	0,95%		2.800,79		3.295,04
	Sobre pneus, Caterpillar-966, 3,5 m3	6	170	1020	0,62%		1.831,28		2.154,45
Caminhões	Wabco W-75, 68t	40	700	28000	17,04%	0,50	50.270,52	148.709,19	59.141,79
	Terex 3309, 54t	45	665	29925	18,21%		53.726,62		63.207,79
	Terex R-35, 32t	22	382	8404	5,11%		15.088,34		17.750,99
	Terex, R-22, 20t	10	250	2500	1,52%		4.488,44		5.280,52
	Caterpillar- 769, 32t	10	400	4000	2,43%		7.181,50		8.448,83
	6t	40	250	10000	6,09%		17.953,76		21.122,07

(continua)

Tabela D.16- (continuação)

Tipo	Descrição	Quant.	Potencia unitária (HP)	Pot acumulada (HP)	% da Potência Total	% por categoria	Consumo (t)	Consumo Categoria (t)	Consumo (m3)
Moto Scraper	Caterpillar –631C, 20 m3	28	450	12600	7,67%	0,08	22.621,74	22.621,74	26.613,81
Cam. irrigação	6.000 a 25.000 l	20	250	5000	3,04%	0,03	8.976,88	8.976,88	10.561,03
Trator esteira	Caterpillar D9-G	5	385	1925	1,17%	0,09	3.456,10	27.756,51	4.066,00
	Caterpillar D8-K	40	285	11400	6,94%		20.467,28		24.079,16
	Caterpillar D7	5	240	1200	0,73%		2.154,45		2.534,65
	Caterpillar D6	4	140	560	0,34%		1.005,41		1.182,84
	Caterpillar D4	5	75	375	0,23%		673,27		792,08
Motoniveladora	Caterpillar 16-G	5	275	1375	0,84%	0,02	2.468,64	5.834,97	2.904,28
	Caterpillar 120-B	15	125	1875	1,14%		3.366,33		3.960,39
Compressor	Atlas Copco ZR-5, 2.000 pcm	10	400	4000	2,43%	0,06	7.181,50	17.027,34	8.448,83
	Atlas Copco PR-700	10	230	2300	1,40%		4.129,36		4.858,08
	Atlas Copco PR-600	8	173	1384	0,84%		2.484,80		2.923,29
	Ingersol-Rand DXL-75	9	200	1800	1,10%		3.231,68		3.801,97
Máquinas para Concretagem	Cami. Dumpcretes, 6m3	47	360	16920	10,30%	0,12	30.377,76	36.661,57	35.738,54
	Caminhão betoneira	14	250	3500	2,13%		6.283,82		7.392,72

Para podermos aplicar os fatores apresentados na AP-42 ainda é necessário identificar os equipamentos da obra na classificação da EPA (ESTADOS UNIDOS, 1985), o que é feito na Tabela D.17, a seguir:

Tabela D.17– Identificação dos equipamentos utilizados nas categorias da EPA.

Tipo	track type tractor	Wheeled tractor	Wheeled dozer	Scraper	Motor grader	Wheeled loader	Track type loader	Off-highway truck	Roller	Compressores	Miscellaneous
Escavadeira							X				
Carregadeira						X					
Caminhões								X			
Moto Scraper				X							
Caminhão irrigação								X			
Trator esteira	X										
Motoniveladora					X						
Compressor										X	
Para Concretagem								X			

Os fatores de emissão dados pela AP-42 (ESTADOS UNIDOS, 1985a) são apresentados na Tabela D.18.

Tabela D.18- Fatores de emissão para equipamentos de construção (ESTADOS UNIDOS, 1985a)

Equipamento	Emissões (kg/m ³)					
	CO	Hidrocarbonetos	NOx	Aldeídos	SOx	Particulado
Trator esteira	9,4	3,31	34,16	0,745	3,73	3,03
Trator rodas	32,19	7,74	52,35	1,23	3,73	5,57
Dozer	14,73	1,58	34,29	0,69	3,74	1,77
Scraper	10,16	2,28	30,99	1,16	3,74	3,27
Motoniveladora	6,55	1,53	30,41	0,517	3,73	2,66
Carregadeira	11,79	5,17	38,5	0,859	3,74	3,51
Carregadeira esteira	9,93	4,85	40,78	0,439	3,74	2,88
Caminhão off-road	14,73	1,58	34,29	0,928	3,74	2,12
Roller	22,73	3,6	48,49	0,731	3,73	2,9
Micelânea	18,41	4,04	44,1	0,813	3,73	3,61

Além destes fatores, admitiu-se os fatores de emissão para compressores que alimentam as perfuratrizes como sendo aqueles dados pela AP-42 para motores estacionários diesel de uso industrial, conforme recomendação do próprio documento para geradores, bombas e equipamentos de perfuração portátil (ESTADOS UNIDOS, 1985b), apresentados na Tabela D.19.

Tabela D.19- Fatores de emissão para motores diesel estacionários de uso industrial (ESTADOS UNIDOS, 1985b)

	Emissões (kg/m ³)					
	CO	HC	NOx	Aldeídos	SOx	MP
Motores estacionários	12.2	4.49	56.2	0.84	3.74	4.01

Um outro fator aplicado adicionalmente aos da EPA, conforme comentado anteriormente, foi o fator de emissão para o CO₂. De acordo com ALVARES; LINKE (2003) esta emissão pode ser estimada como 3.140 g/kg de combustível, segundo dados europeus disponibilizados pelo IPCC- International Panel on Climate Change, tendo ainda em conta segundo a mesma referência, uma densidade de 0,85 kg/l de diesel, o que resulta num fator de emissão de 2,6 kg de CO₂/l combustível.

Aplicando os fatores de CO₂ acima e os demais fatores das Tabelas D.18 e D.19, sobre os dados da Tabela D.17, temos as estimativas de emissão dos equipamentos de construção pesada apresentadas na Tabela D.20.

Tabela D.20- Estimativa das emissões dos equipamentos de construção.

	Consumo (m ³)	Emissões (g)						
		CO	HC	NO _x	Aldeídos	SO _x	MP	CO ₂
Escavadeiras	6.438,01	63.929.405	31.224.331	262.541.907	2.826.284	24.078.144	18.541.458	1,72E+10
Carregadeiras	25.811,17	304.313.670	133.443.738	993.729.967	22.171.793	96.533.768	90.597.199	6,89E+10
Caminhões	174.951,98	2.577.042.710	276.424.133	5.999.103.500	162.355.440	654.320.416	370.898.204	4,67E+11
Moto Scrapers	26.613,81	270.396.275	60.679.479	824.761.866	30.872.015	99.535.636	87.027.147	7,10E+10
Caminhões Irrigação	10.561,03	155.564.036	16.686.434	362.137.868	9.800.639	39.498.268	22.389.392	2,82E+10
Tratores Esteira	32.654,72	324.261.352	158.375.383	1.331.659.410	14.335.421	122.128.646	94.045.588	8,72E+10
Motoniveladoras	6.864,67	44.963.603	10.502.948	208.754.685	3.549.035	25.605.227	18.260.028	1,83E+10
Compressores	20.032,17	244.392.473	89.944.443	1.125.807.953	16.827.022	74.920.315	80.329.001	5,35E+10
Máq. Concretagem	43.131,26	635.323.523	68.147.397	1.478.971.054	40.025.813	161.310.928	91.438.280	1,15E+11
Soma	3,47E+05	4,62E+09	8,45E+08	1,26E+10	3,03E+08	1,30E+09	8,74E+08	9,26E+11

Somando os valores dados pela Tabela D.20, chegamos ao resultado final para as emissões dos equipamentos de construção, durante toda a obra de Itaipu, dados na Tabela D.21.

Tabela D.21- Estimativa final das emissões dos equipamentos de construção

Poluente	Emissões totais (t)
CO	4.620
HC	845,4
NO _x	12.587
Aldeídos	302,8
SO _x	1.298
MP	873,5
CO ₂	926.300

d. transporte do diesel

Para os fins deste estudo, será considerado o transporte do diesel utilizado na operação das máquinas de construção civil. Como já apresentado, as máquinas de construção consumiram na obra um total de 295 mil toneladas de diesel (CAVALCANTI, 1979).

Na ausência de dados mais precisos, será considerado para os fins desta estimativa que os veículos de transporte de diesel foram caminhões tanque, com a capacidade típica deste tipo de veículo, de 40 m³ (ESSO, 2003), e com o “cavalo mecânico” idêntico ao utilizado para o transporte de cimento, cinzas e aço estrutural, ou seja, utilizou-se um modelo de transporte de caminhão de 30t, descrito no Anexo E.

Uma vez que a origem deste diesel não foi dada, mas sabe-se que é de fornecimento exclusivo da PETROBRÁS (CAVALCANTI, 1979), trabalharemos com a

aproximação de que todo o diesel foi fornecido pela REPLAN- Refinaria de Paulínia, em Paulínia/ SP, que iniciou suas operações em 1972 e desde então é a maior refinaria da América Latina (PETROBRÁS, 2003).

A distância da REPLAN até Itaipu foi estimada utilizando guias rodoviários da época da obra (QUATRO RODAS, 1985, 1986), e os cálculos são apresentados na Tabela D.22.

Tabela D.22– Distância REPLAN para Itaipu (QUATRO RODAS, 1985, 1986).

Estrada	Distância (km)	Até
SP-330	61	Sorocaba/ SP
SP-270	285	Ourinhos/ SP
BR-369	549	Cascavel/ PR
BR-277	143	Foz/ PR
TOTAL	1.038 km	

Desta forma, estima-se que o transporte do óleo diesel tenha percorrido uma distância de 1.038 km. Admitindo o transporte de 295.000 t de diesel, tem-se ao final um total de $3,062 \cdot 10^8$ t.km de transporte para o diesel.

D.3.4 Uso do solo

Embora a ACV atualmente não contemple o uso do solo em sua metodologia, considerou-se relevante neste caso incluir este aspecto ambiental no ICV, como se fosse um fluxo elementar, uma vez que diversos impactos ambientais usualmente atribuídos às usinas hidrelétricas ocorrem como resultado das modificações do uso do solo, principalmente pela formação do reservatório.

Desta forma, decidiu-se considerar o uso do solo na construção de Itaipu, que será estimado como o valor oficial de área do reservatório, de 1.350 km² (ITAIPU BINACIONAL, 2002). Este valor deve-se dizer, varia ao longo do ano de acordo com o nível do reservatório, por exemplo, SANTOS (2000) apresenta um valor de 1.490 km², obtido de medições a partir de imagens de satélite.

Além disso, há que se considerar que por conta do empreendimento de Itaipu houve alteração do solo em uma área muito além do reservatório, se considerarmos as instalações da empresa, os alojamentos, as áreas de compensação ambiental, etc. No entanto, como indicado em RIBEIRO (2003), percebe-se que internacionalmente quando se trata de uso de solo para hidrelétricas o que se considera são unicamente

as áreas dos reservatórios. Desta forma neste estudo se adotará esta hipótese, recomendando no entanto que posteriormente sejam realizadas investigações sobre outras possíveis alterações do solo decorrentes do empreendimento.

D.4 Produção de concreto

Como já apresentado no Anexo C, para a construção da usina de Itaipu foram consumidos $12,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de concreto armado. Para que toda esta quantidade de concreto fosse obtida, transportada e lançada nas obras civis da barragem, casa de força e outras estruturas, montou-se um canteiro de obras de proporções industriais.

Nesta parte do Anexo, são estimados os consumos de insumos para a obtenção deste concreto, como cimento, cinzas, areia, água e aditivos, os consumos de aço para a estrutura do concreto armado e madeira para as formas.

Além disso, como já justificado nas recomendações realizadas a partir da experiência internacional, no Capítulo 3 e no Capítulo 5, são também estimados os consumos de aço, concreto e eletricidade na instalação e operação do canteiro de obras.

Adicionalmente a estes processos, estimou-se também o consumo elétrico na iluminação do canteiro durante o período da obra.

D.4.1 Consumo de insumos para o concreto

a. consumo de cimento

Segundo dados da ITAIPU BINACIONAL (MESCOLIN, 2002), a quantidade total de cimento entregue na usina foi de 2.475.828.070,50 kg, ou $1.980.662.456,40 \text{ m}^3$.

Consultando o pessoal da empresa envolvido na obra de construção (FABRO; LIMA, 2002), tem-se que este cimento foi transportado por meio de caminhões conhecidos como “cebolão”, de tara 30t.

Para obter a distância média de transporte, estimou-se o percentual de cimento fornecido por cada planta, e aplicou-se estes valores como ponderação para as distâncias estimadas.

Para tanto, inicialmente levantou-se a relação dos fornecedores deste insumo, como sendo (MESCOLIN, 2002):

- Cia de Cimento Portland Rio Branco – Rio Branco do Sul/ PR;
- Cimento S^{ta} Rita – Salto de Pirapora/ SP;

- Cia de Cimento Itambé – Balsa Nova/ PR;
- Cia de Cimento Portland Barroso – Barroso/ MG;
- Cia de Cimento Portland Eldorado – Apiai/ SP;
- Cia de Cimento Portland Goiás – Palmeiras de Goiás/ GO;
- Itabira Agro Industria S/A – Cimento Nassau – Capão Bonito/ SP, e
- Industria Nacional del Cemento - Puerto Vallemi/ Paraguai.

Uma vez que não se possui informação sobre a quantidade de cimento fornecida por cada planta, decidiu-se alocar a quantidade total pela capacidade produtiva de cada planta fornecedora, conforme é praxe neste tipo de empreendimento, segundo o prof. Vanderley John, do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da USP (JOHN, 2003).

Desta forma, levantou-se a produção nominal das plantas para o ano de 1977, anterior de início da concretagem, quando devem ter sido realizados os acordos de fornecimento do cimento. Estas produções são apresentadas na Tabela D.23 (SNIC, 1978).

Tabela D.23– Produção de cimento em 1977 pelas plantas fornecedoras da obra de Itaipu no Brasil (SNI, 1978).

Empresa	Município	Produção em 1977 (mil t)
Cia de Cimento PORTLAND Rio Branco	Rio Branco do Sul/ PR	800
Cia de Cimento Sta Rita	Salto de Pirapora/ SP	350
Cia de Cimento Itambé	Balsa Nova/ PR	175
Cia de Cimento PORTLAND Barroso	Barroso/ MG	1.250
Cia de Cimento PORTLAND Eldorado	Apiai/ SP	700
Cia de Cimento PORTLAND Goiás	Palmeiras de Goiás/ GO	200
Itabira Agro Industria S/A – Cimento NASSAU	Capão Bonito/ SP	200
	SOMA	3675

A planta de cimento Vallemí, no Paraguai não consta deste cadastro, que contém apenas as empresas brasileiras. Para que se tenha uma estimativa de seu fornecimento, obteve-se apenas, em um cadastro norte-americano, um dado de sua capacidade instalada no ano de 2000, de 675.000 t/ano (VELASCO, 2003). Como este valor é da mesma ordem de grandeza da planta de cimento da Cia. De Cimento PORTLAND Goiás, que em 2000 produziu 713.534 t (SNIC, 2001), admitiremos a capacidade em 1977 igual a desta empresa.

Com estas hipóteses, e a quantidade inicialmente dada de cimento, podemos estimar a distribuição do fornecimento entre as plantas como na Tabela D.24.

Tabela D.24– Estimativa de fornecimento de cimento para Itaipu, por planta.

Empresa	Município	Produção 1977 (t)	%	Quantidade cimento (t)
Cia de Cimento PORTLAND Rio Branco	Rio Branco do Sul/ PR	800	20,65%	511.138,70
Cia de Cimento Sta Rita	Salto de Pirapora/ SP	350	9,03%	223.623,18
Cia de Cimento Itambé	Balsa Nova/ PR	175	4,52%	111.811,59
Cia de Cimento PORTLAND Barroso	Barroso/ MG	1250	32,26%	798.654,22
Cia de Cimento PORTLAND Eldorado	Apiai/ SP	700	18,06%	447.246,36
Cia de Cimento PORTLAND Goiás	Palmeiras de Goiás/ GO	200	5,16%	127.784,67
Itabira Agro Industria S/A	Capão Bonito/ SP	200	5,16%	127.784,67
Industria Nacional del Cemento	Puerto Vallemí-Paraguai.	200	5,16%	127.784,67

De modo a estimar a distância de cada uma destas plantas até a obra obteve-se os itinerários preferenciais, em termos genéricos, de CAVALCANTI (1979), e para cálculo das distâncias específicas utilizou-se mapas e guias rodoviários o mais contemporâneos possíveis à obra (QUATRO RODAS, 1985; QUATRO RODAS, 1986), de modo a realizar as estimativas com as estradas disponíveis na época da construção.

Os valores obtidos para cada planta são apresentados, por trecho percorrido, na Tabela D.25.

Tabela D.25– Distâncias das plantas fornecedoras de cimento até a obra (QUATRO RODAS, 1985; QUATRO RODAS, 1986).

Cia Cimento Portland Rio Branco – Rio Branco do Sul/ PR		
Caminho	Distância (km)	Até
Estrada de terra	32	Curitiba
BR- 277	482	Cascavel
BR- 277	137	Foz
TOTAL	651 km	
Cia Cimento Itambé – Balsa Nova/ PR		
Caminho	Distância (km)	Até
Estrada local	17	BR-277
BR- 277	454	Cascavel/ PR
BR- 277	137	Foz/ PR
TOTAL	608 km	
Cia Cimento Santa Rosa – Salto de Pirapora/ SP		
Caminho	Distância (km)	Até
Estrada terra	~20	Piedade/ SP
Estrada local	99	Juquiá/ SP
BR- 116	248	Curitiba/ PR

(continua)

Tabela D.25- (continuação)

Cia Cimento Santa Rosa – Salto de Pirapora/ SP		
BR- 277	482	Cascavel/ PR
BR- 277	137	Foz/ PR
TOTAL	986 km	
Cia de Cimento Portland Eldorado – Apiaí/ SP		
Caminho	Distância (km)	Até
SP- 250	37	Fronteira SP/PR
BR- 476	119	Curitiba/ PR
BR- 277	482	Cascavel/ PR
BR- 277	137	Foz/ PR
TOTAL	775 km	
Itabira Agroindustria S/A – Capão Bonito/ SP		
Caminho	Distância (km)	Até
SP-250	95	Apiaí/ SP
SP- 250	37	Fronteira SP/PR
BR- 476	119	Curitiba/ PR
BR- 277	482	Cascavel/ PR
BR- 277	137	Foz/ PR
TOTAL	870 km	
Cia de Cimento Portland Goiás – Palmeira de Goiás/ GO		
Caminho	Distância (km)	Até
Estrada de terra	26	BR- 060
BR- 060	66	Goiânia/ GO
BR-153	203	Itumbiara/ MG
BR-153	252	Fronteira/ MG
BR-153	328	Ourinhos/ SP
BR-369	549	Cascavel/ PR
BR-277	137	Foz/ PR
TOTAL	1.561 km	
Cia de Cimento Portland Barroso – Barroso / MG		
Caminho	Distância (km)	Até
BR-265	140	BR-381
BR-381	236	Extrema/ MG
BR-381	124	São Paulo/ SP
SP-270	347	Ourinhos/ SP
BR-369	549	Cascavel/ PR
BR-277	137	Foz/ PR
TOTAL	1.533 km	

Não foi encontrada na literatura a distância da planta de cimento em Puerto Vallemí no Paraguai. Desta forma, utilizou-se o mapa dado por BRAGA; SONADA (1983), que apresenta a planta a um raio de cerca de 450 km da obra, aproximadamente o mesmo raio da planta de cimento Rio Branco. Desta forma, admitiu-se para a planta de Vallemí a mesma distância da planta de Rio Branco do Sul, de 650 km.

Como já apresentado, para obter a distância média de transporte do cimento, calculou-se a média das distâncias das plantas, ponderada pelo percentual de cimento fornecido por cada uma, cálculo este apresentado na Tabela D.26.

Tabela D.26– Cálculo da distância para transporte de cimento para Itaipu.

Empresa	%	Distância (km)	Contribuição (km)
Cia de Cimento PORTLAND Rio Branco	20,65	651	134,4
Cia de Cimento Sta Rita	9,03	986	89,0
Cia de Cimento Itambé	4,52	608	27,5
Cia de Cimento PORTLAND Barroso	32,26	1533	494,5
Cia de Cimento PORTLAND Eldorado	18,06	775	140,0
Cia de Cimento PORTLAND Goiás	5,16	1561	80,4
Itabira Agro Industria S/A	5,16	870	44,9
Industria Nacional del Cemento	5,16	650	33,5
SOMA			1.044,3

Desta forma tem-se para o transporte de cimento, realizado em caminhões de 30t, a distância média percorrida de 1.044 km. Considerando o transporte de 2.475.828 t de cimento no total, obtém-se um total de $2,59.10^9$ t.km de transporte para o cimento.

b. consumo de cinzas

Temos que na construção de Itaipu houve um significativo consumo de cinzas de termelétrica, adicionadas ao cimento para a produção do concreto. Segundo os dados da empresa (MESCOLIN, 2002), foram consumidas na obra 299.519.053,00 kg ou 374.397.566,25 m³ de cinzas, originadas em usinas termelétricas a carvão, a saber:

- usina termelétrica Candiota - Candiota/ RS, e
- usina termelétrica Jorge Lacerda- Tubarão/ SC.

Consultando novamente os envolvidos na obra de construção (FABRO; LIMA, 2002), tem-se que as cinzas chegaram na obra em caminhões, que serão igualmente admitidos como sendo de capacidade 30t.

Para estimar a distância média de transporte, procede-se do mesmo modo que para o cimento, calculando a contribuição de cada planta e usando este percentual como fator de ponderação de suas distâncias no cálculo da distância média.

Uma vez que não foi disponibilizada a quantidade de cinzas enviada por cada planta, será admitido para fins deste estudo que a repartição entre ambas foi realizada em função da potência instalada em cada uma à época do início da concretagem, em 1977 (ITAIPU BINACIONAL, 1981b).

A usina de Candiota I, de acordo com o histórico fornecido pela COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO (2003), operou apenas até 1974. Após esta data foi instalada em seu lugar a usina de Candiota II, também conhecida como

“Usina Termelétrica Presidente Médici”, que até 1986 possuía apenas sua Fase A instalada, com uma potência de 126 MW. Uma vez que nesta data, 1986, as obras civis já estavam no final, esta potência será admitida para fins de alocação do fornecimento de cinzas.

Já a usina Jorge Lacerda teve sua instalação realizada em partes, segundo dados da atual operadora (TRACTEBEL, 2003), a saber:

- 1965: instalação da unidade 1, com 50 MW;
- 1967: instalação da unidades 2, com 50 MW;
- 1973: instalação da unidades 3, com 66 MW;
- 1974: instalação da unidade 4, com 66 MW;
- 1979: instalação da unidade 5, com 131 MW;
- 1980: instalação da unidade 6, com 131 MW;
- 1996: instalação da unidade 7, com 363 MW.

Desta forma, para fins desta estimativa tomaremos a potência instalada em 1977, de 232 MW.

Com estes dois valores, temos que a Usina de Candiota, com 126 MW, responderia por 35,2% do fornecimento, enquanto a Usina Jorge Lacerda, com 232 MW, responderia pelos 64,8% restantes. Em quantidades físicas, isso significa 105.417,3 t de cinzas provenientes de Candiota, e 194.101,7 t provenientes de Tubarão.

Para estimar a distância de cada uma destas plantas até a obra, obteve-se os itinerários preferenciais em CAVALCANTI (1979), e as distâncias específicas dos guias rodoviários (QUATRO RODAS, 1985, 1986). Os valores obtidos para cada planta são apresentados na Tabela D.27.

Tabela D.27– Distâncias das plantas fornecedoras de cinzas até a obra (QUATRO RODAS, 1985, 1986).

Usina Termelétrica de Carioba- Carioba/ RS		
Caminho	Distância (km)	Até
Estrada de terra	15	BR-293
BR-293	129	Pelotas/ RS
BR-116	982	Curitiba/ PR
BR- 277	482	Cascavel/ PR
BR- 277	137	Foz/ PR
TOTAL	1.745km	

(continua)

Tabela D.17- (continuação)

Usina Termelétrica Jorge Lacerda- Tubarão/ SC		
Caminho	Distância (km)	Até
BR-101	144	Florianópolis/ SC
BR-101	300	Curitiba/ PR
BR- 277	482	Cascavel/ PR
BR- 277	137	Foz/ PR
TOTAL	1.063 km	

Aplicando os fatores de 35,2% à distância de Candiota, distante 1.745 km de Itaipu, e o fator de 64,8% à usina Jorge Lacerda, distante 1.063 km, chega-se à uma distância média percorrida de 1.303 km. Admitindo o transporte de 299.519t de cinzas, tem-se o total de $3,903 \cdot 10^8$ t.km de transporte para as cinzas.

c. consumo de água

Na construção de Itaipu existiram diversos pontos de uso de água. No entanto, para as finalidades deste estudo, será considerado apenas o consumo consuntivo de água de amassamento, ou seja, a água incorporada na produção do concreto.

Outros usos que poderiam ser incluídos, mas que não o foram por se considerar que são desprezíveis, são o consumo de água no resfriamento de agregados, que é reduzido pois o sistema opera em circuito fechado, e a água de abastecimento para os operários. Além disso, no fechamento do reservatório ocorre a captação de grande volume de água, mas como seu uso não é consuntivo, ou seja, esta é apenas armazenada e não efetivamente consumida, este volume não será considerado neste estudo.

Para estimar a quantidade de água de amassamento consumida, não se dispõe de dados primários. Esta água em geral é adicionada à massa até que se dê a liga do concreto, e a empresa não possui registros fiéis de seu consumo (MESCOLIN, 2002). Como não há valor disponível, foi solicitada uma estimativa para os técnicos da própria empresa, que apresentaram o valor médio de 170 kg água/ m³ de concreto, sendo 20% na forma líquida e 80% como gelo (MESCOLIN, 2002).

Considerando o volume de concreto da obra como 12.694.430,20 m³ (MESCOLIN, 2002), temos um volume de 2.158.053,13 m³ de água (entre água no estado líquido e gelo).

d. areia natural

Conforme literatura publicada pela empresa (ITAIPU BINACIONAL, 1994), a areia artificial obtida da britagem da rocha extraída não foi suficiente como agregado fino do concreto, sendo utilizada então areia natural dragada do leito do rio Paraná. De acordo com a referência, foi necessário que 30% da areia da obra fosse extraída desta forma.

Segundo dados da empresa (MESCOLIN, 2002), foram usados 3.220.608.398,50 kg ou 2.190.890.067,01 m³ de areia natural, mas de acordo com BRAGA, SONADA, (1983), foram dragados do leito do rio cerca de 2,5.10⁶ m³ de areia. Uma vez que esta segunda estimativa, superior à primeira, se refere à areia extraída, e não apenas à utilizada no concreto, o que inclui perdas e outros usos, admitiremos que foram extraídos 2,5.10⁶ m³ de areia natural para a obra de Itaipu. Aplicando a densidade de 1,47 t/ m³ para a areia, calculado pelos dados da ITAIPU BINACIONAL (MESCOLIN, 2002), temos uma quantidade de 3,675.10⁶ t de areia.

Há que se considerar que para dragar esta quantidade de areia foi necessário utilizar bombas de dragagem movidas a energia elétrica. Segundo a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1980), as bombas centrífugas utilizadas na dragagem tinham capacidade de 6.800 m³/h, e potência de 1600 HP. Para o volume dado acima, seria necessário seu funcionamento a plena capacidade por 367,6 horas, o que representa um consumo elétrico de 438,5 MWh para extração da areia.

e. aditivos

Aditivos são elementos incorporados ao concreto para melhorar certas características mecânicas ou do seu processo de cura.

Segundo a empresa, os principais aditivos utilizados foram (MESCOLIN, 2002):

- incorporador de ar: 0,05 a 0,15% do peso em cimento;
- plastificante e plastificante redutor de água: 0,20 a 0,30% do peso em cimento;
- superplastificante e super fluidificante: 1 a 3% do peso em cimento;
- retardador de pega: 0,20 a 0,40% do peso em cimento;

Estas percentagens, segundo ANDRIOLO (2002), são aplicadas sobre as quantidades de cimento em cada mix do concreto apenas quando os aditivos são usados, o que

nem sempre ocorria em Itaipu. Portanto, aplica-las sobre o montante total de cimento seria uma super estimativa, e segundo o engenheiro nenhum destes aditivos foi consumido em proporção realmente significativa.

Apenas para verificação, um dado que embora não seja fornecido pela empresa pode servir como referência é o apresentado pela THEMAG (1982), que afirma terem sido aplicados cerca de 3.400 t de aditivos em toda a obra.

Tendo em vista que essa quantidade é desprezível perto das demais envolvidas no processo (significa menos de 0,1% apenas do peso de cimento, ou 0,011% do peso de concreto), e que em geral estes aditivos são compostos de 90% do peso em água, e o restante de resinas poliméricas, percebe-se que o consumo de aditivos pode ser desprezado sem prejuízos à qualidade do estudo.

f. aço estrutural

Quanto às quantidades de aço estrutural, foi fornecido um dado primário pela empresa (MESCOLIN, 2002) de que foram consumidas 478.270 t de aço em barras, dos tipos CA-50 (37%) e CA-25 (63%) (UNICON, 1978).

Consultando novamente os envolvidos na obra de construção (FABRO; LIMA, 2002), tem-se que o aço chegou na obra em caminhões, que serão admitidos novamente como sendo de 30t.

Cabe dizer que, embora hajam outros consumos de aço na obra, apenas para este será considerado o transporte. Para estimativa da distância média, procede-se do mesmo modo que no caso do cimento e das cinzas.

De acordo com a empresa (MESCOLIN, 2002), os fornecedores de aço estrutural foram:

- Cia Siderúrgica Riograndense- Sapucaia do Sul/ RS;
- Cia Siderúrgica Dedini- Piracicaba/ SP;
- Cia Siderúrgica Guaíra- Curitiba/ PR;
- Cia Siderúrgica Cosigua- Rio de Janeiro/ RJ;
- Cia Siderúrgica Pains- Divinópolis/ MG;
- Cia Siderúrgica Nacional- Mogi das Cruzes/ SP, e
- Cia Siderúrgica Coferraz- São Caetano do Sul/ SP.

Para alocar a quantidade total pelas plantas fornecedoras, novamente utilizou-se a estratégia de distribuir o total fornecido proporcionalmente à capacidade de produção das plantas no ano de 1977.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela D.28, a seguir (IBS, 1983).

Tabela D.28– Produção de aço bruto e laminado em 1977 pelas plantas fornecedoras de Itaipu (IBS, 1982)

Empresa	Produção 1977 (t)		% aço bruto	% laminados
	Aço Bruto	Laminados		
Cia Siderúrgica Coferraz	218.065	196.223	15,5%	15,8%
Cia Siderúrgica Cosigua	421.821	396.736	30,0%	32,0%
Cia Siderúrgica Dedini	142.304	109.983	10,1%	8,9%
Cia Siderúrgica Guaira	44.472	36.778	3,2%	3,0%
Cia Siderúrgica Nacional	179.533	154.163	12,8%	12,4%
Cia Siderúrgica Pains	166.773	154.901	11,9%	12,5%
Cia Siderúrgica Riograndense	232.423	190.494	16,5%	15,4%
SOMA	1.405.391	1.239.278		

Decidiu-se utilizar a distribuição dada pela produção de laminados, por ser este o tipo de processo para produção das barras de construção civil. Aplicando estes percentuais à quantidade de aço total, temos as quantidades de aço por planta apresentadas na Tabela D.29.

Tabela D.29- Estimativa de fornecimento de aço estrutural para Itaipu, por planta.

Empresa	% laminados	Fornecimento aço (t)
Cia Siderúrgica Coferraz	15,83%	75.728
Cia Siderúrgica Cosigua	32,01%	153.111
Cia Siderúrgica Dedini	8,87%	42.445
Cia Siderúrgica Guaira	2,97%	14.194
Cia Siderúrgica Nacional	12,44%	59.496
Cia Siderúrgica Pains	12,50%	59.780
Cia Siderúrgica Riograndense	15,37%	73.517
Total	100,00%	478.270

As distâncias das plantas à obra foram estimadas de modo idêntico ao realizado para cimento e cinzas. Os valores obtidos para cada planta são apresentados na Tabela D.30.

Tabela D.30– Distâncias das plantas fornecedoras de aço estrutural para Itaipu (QUATRO RODAS, 1985; QUATRO RODAS, 1986).

Cia Siderúrgica Riograndense – Sapucaia do Sul/ RS		
Caminho	Distância (km)	Até
BR-116	687	Curitiba
BR- 277	482	Cascavel/ PR
BR- 277	137	Foz/ PR
TOTAL	1.306 km	
Cia Siderúrgica Dedini- Piracicaba/ SP		
Caminho	Distância (km)	Até
SP-127	123	SP-270
SP-270	213	Ourinhos/ SP
BR-369	549	Cascavel/ PR
BR-277	143	Foz/ PR
TOTAL	1.028 km	
Cia Siderúrgica Guaíra- Curitiba/PR		
Caminho	Distância (km)	Até
BR- 277	482	Cascavel/ PR
BR- 277	137	Foz/ PR
TOTAL	619 km	
Cia Siderúrgica Cosigua- Rio de Janeiro/ RJ		
Caminho	Distância (km)	Até
BR-116	429	São Paulo/ SP
SP-270	347	Ourinhos/ SP
BR-369	549	Cascavel/ PR
BR-277	143	Foz/ PR
TOTAL	1.468 km	
Cia Siderúrgica Pains- Divinópolis/ MG		
Caminho	Distância (km)	Até
Estrada Local	72	BR-381
BR-381	328	Extrema/ MG
BR-381	124	São Paulo/ SP
SP-270	347	Ourinhos/ SP
BR-369	549	Cascavel/ PR
BR-277	143	Foz/ PR
TOTAL	1.563 km	
Cia Siderúrgica Nacional- Mogi das Cruzes/ SP		
Caminho	Distância (km)	Até
BR-116	58	São Paulo/ SP
SP-270	347	Ourinhos/ SP
BR-369	549	Cascavel/ PR
BR-277	143	Foz/ PR
TOTAL	1.097 km	
Cia Siderúrgica Coferraz- São Caetano do Sul/ SP		
Caminho	Distância (km)	Até
SP-150	12	São Paulo/ SP
SP-270	347	Ourinhos/ SP
BR-369	549	Cascavel/ PR
BR-277	143	Foz/ PR
TOTAL	1.051 km	

Aplicando os percentuais da Tabela D.29 para ponderação das distâncias da Tabela D.30, obtém-se a distância média, conforme exposto na Tabela D.31.

Tabela D.31– Distâncias percorridas para o transporte de aço estrutural para Itaipu.

Empresa	%	Distância (km)	Contribuição (km)
Cia Siderúrgica Coferraz	15,83%	1051	166
Cia Siderúrgica Cosigua	32,01%	1468	470
Cia Siderúrgica Dedini	8,87%	1028	91
Cia Siderúrgica Guaira	2,97%	619	18
Cia Siderúrgica Nacional	12,44%	1097	136
Cia Siderúrgica Pains	12,50%	1563	195
Cia Siderúrgica Riograndense	15,37%	1306	201
		SOMA	1.278

Desta forma, estima-se que para o transporte do aço estrutural de Itaipu percorreu-se uma distância média de 1.278 km. Considerando o transporte de 478.270t de aço, tem-se um total de $6,11.10^8$ t.km de transporte para o aço estrutural de Itaipu.

g. madeira para formas

Na obra de Itaipu utilizou-se grande quantidade de madeira para as formas de concreto. Segundo a UNICON (1978b), o consumo médio era de 8.200 m² formas/mês, com 0,06 m³ madeira/ m² forma. Ainda segundo previsões da UNICON (1978b), aplicando estes valores para a obra estima-se um consumo de 8.500 m³ de madeira, para a obra. Considerando a densidade de 0,62 t/m³ para a madeira, temos um total de 5.270t de madeira.

De acordo com ANDRIOLO (2003), esta madeira vinha da própria região, o que significa que não houve transporte a longa distância. Cabe dizer que neste estudo a madeira consumida será admitida como fluxo elementar.

D.4.2 Canteiro de Obras

A obra de Itaipu exigiu a criação de uma infra-estrutura em seu canteiro de obras de proporções industriais nunca antes vista. Considerando que grande parte dos equipamentos teve sua vida útil esgotada neste empreendimento, e que o funcionamento desta estrutura foi todo movido à base de energia elétrica, considerou-se relevante estimar as quantidades de aço, concreto e o consumo elétrico do canteiro de obras, de modo a verificar sua relevância no contexto do empreendimento.

Nesta parte do Anexo portanto, faz-se uma aproximação destas quantidades, tendo em vistas os dados divulgados pela empresa. Além de hipóteses pontuais indicadas ao longo dos cálculos, admitiu-se, como aproximação superestimada, que todo o peso dos equipamentos era constituído de aço.

A seguir, os cálculos para cada sistema do canteiro, já descritos brevemente no Anexo C, a saber: central de ensilagem, central de britagem, central de refrigeração, central de concreto e lançamento do concreto.

a. central de ensilagem

• *peso em aço:*

De acordo com as estimativas fornecidas (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977), em cada margem do canteiro temos 3 grupos de silos, com diferentes configurações. Para os fins desta estimativa, decidiu-se dividir os silos e suas configurações em três tipos de silos para cimento (a, b e c) e dois tipos para as cinzas (a e b).

A Tabela D.32 apresenta a relação dos equipamentos e suas características.

Tabela D.32- Dados dos equipamentos das centrais de ensilagem, por margem do canteiro (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)

	Quantidade						Potência Unitária (HP)						Capacidade Unitária (t/h)						Peso Unitário (t)					
	Cimento			Cinzas			Cimento			Cinzas			Cimento			Cinzas			Cimento			Cinzas		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c			
Bomba descarga silo estoque	2	0	0	2	2	30	0	0	60	30	55	0	0	50	25	2	0	0	1,8	2				
Compressor desc. Silo estoq.	2	0	0	2	2	75	0	0	100	60	55	0	0	55	25	1,65	0	0	1,7	0,8				
Silos de Estoque	12	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,5	0	0	30,5	0				
Parafusos helicoidais	1	1	4	2	2	75	75	10	75	10	100	100	50	100	50	6,3	7	2	6,3	2				
Silos de Transferência	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0				
Bomba sist. Transp aglomer.	3	0	0	1	1	125	0	0	100	48	50	0	0	50	38	1,8	0	0	4,4	1,8				
Compressor sist. Transp. Aglom.	3	0	0	1	1	200	0	0	150	60	50	0	0	50	38	2,6	0	0	2,5	1,65				
Transp. Pneumat.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0				

Multiplicando os pesos de cada equipamento pela sua quantidade, chegamos à estimativa do peso das centrais de ensilagem em cada margem, dados na Tabela D.33.

Tabela D.33 – Estimativa do peso de aço na central de ensilagem, por cada margem do canteiro.

		Peso (t)	Peso total (t)
Bomba descarga silo estoque	Cimento	4,0	11,6
	Cinzas	7,5	
Compressor descarga do. Silo estoque	Cimento	3,3	8,3
	Cinzas	5,0	
Silos de Estoque	Cimento	366	427
	Cinzas	61	
Parafusos helicoidais	Cimento	21,3	37,9
	Cinzas	16,6	
Silos de Transferência	-	24,0	24
Bomba sistema transporte aglomerantes	Cimento	5,4	11,6
	Cinzas	6,2	
Compressor sistema transporte aglomerantes	Cimento	7,8	11,95
	Cinzas	4,15	
Estrutura transporte pneumático	-	22,0	22
TOTAL			554,35

Desta forma, calculando o valor para as duas margens e aproximando as casas decimais, estima-se em 1.109 t o consumo de aço nas centrais de ensilagem.

- *consumo elétrico*

Uma vez que não dispomos das horas de trabalho de cada equipamento, decidiu-se utilizar uma aproximação do consumo elétrico pela quantidade de material ensilado. A Tabela D.34 apresenta as estimativas realizadas para os consumos específicos nos silos, em kWh/t de produto, para cada configuração, utilizando os dados fornecidos pela REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977).

Tabela D.34 – Estimativa do consumo específico dos equipamentos das centrais de ensilagem.

	Potência Unitária (kW)					Consumo Específico (kWh/t)				
	Cimento			Cinzas		Cimento			Cinzas	
	a	b	c	a	b	a	b	c	a	b
Bomba descarga silo estoque	22,37	0,00	0,00	44,74	22,37	0,41	0,00	0,00	0,89	0,89
Compressor desc. Silo estoq.	55,93	0,00	0,00	74,57	44,74	1,02	0,00	0,00	1,36	1,79
Silos de Estoque	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Parafusos helicoidais	55,93	55,93	7,46	55,93	7,46	0,56	0,56	0,15	0,56	0,15
Silos de Transferência	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bomba sist. Transp aglomer.	93,21	0,00	0,00	74,57	35,79	1,86	0,00	0,00	1,49	0,94
Compressor sist. transp.	149,14	0,00	0,00	111,86	44,74	2,98	0,00	0,00	2,24	1,18
Estrutura transporte pneum.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL						6,83	0,56	0,15	6,54	4,95

Uma vez que não há como determinar, com a atual disponibilidade de informações, o quanto de cada aglomerante foi ensilado em cada configuração, decidiu-se adotar para esta estimativa que todo o aglomerante foi ensilado pela configuração de maior consumo específico. Desta forma, temos os seguintes valores:

- ensilagem do cimento: 6,83 kWh/t de cimento, e
- ensilagem das cinzas: 6,54 kWh/t de cinzas;

Admitindo que todo o cimento e cinzas consumidos na obra passam pelos silos, para os volumes totais de cimento (2.475.828,07 t) e cinzas (299.519,05 t) dados pela empresa (MESCOLIN, 2002), chegamos aos seguintes consumos elétricos:

- 16.909.905,72 kWh para ensilagem do cimento, e
- 1.958.854,59 kWh para ensilagem das cinzas.

Somando estes valores, chegamos à estimativa do consumo elétrico das centrais de ensilagem, como 18.868.760 kWh.

- *concreto*

De acordo com a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977), para as fundações das centrais de ensilagem consumiu-se cerca de 1.000 m³ de concreto por margem, o que resulta numa estimativa de 2.000 m³.

b. central de britagem

- *peso em aço*

Para as centrais de britagem, a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977) apresenta a relação de equipamentos descritos na Tabela D.35, para cada margem do canteiro de obras.

Tabela D.35 – Peso dos equipamentos das centrais de britagem, por cada margem do canteiro de obras (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

	Massa (t)	
	ME	MD
Britadores, alimentadores, peneiras, classificadores	650	800
Estrutura Suporte	270	200
Transportadores Correia	1650	1860
Silos Metálicos	380	310
TOTAL	2950	3170

Somando estes valores, chega-se à estimativa de 6.120 t em aço nas centrais de britagem, contando ambas as margens.

- *consumo elétrico*

A referência utilizada (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977) apresenta para os equipamentos das centrais de britagem as potências dadas na Tabela D.36.

Tabela D.36- Potência dos equipamentos instalados na central de britagem, por margem do canteiro de obras (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)

	Quantidade		Potência Unitária (HP)		Potência Total (HP)	Potência Total (kW)
	ME	MD	ME	MD		
Alimentador vibratório	41	45	354	400	32514	24245,69
Alimentador de correias	10	8	46	60	940	700,958
Britador Primário	2	2	600	500	2200	1640,54
Britador Secundário	2	2	600	600	2400	1789,68
Britador Terciário	2	2	600	600	2400	1789,68
Britador Quaternário	4	4	800	800	6400	4772,48
Peneiras lavadoras	6	6	240	210	2700	2013,39
Peneiras classificadoras	12	17	380	489	12873	9599,3961
Peneiras desaguadoras	4	4	100	100	800	596,56
Classificador helicoidal	4	4	70	100	680	507,076
Transportados correias 30"	33	33	605	534	37587	28028,626
Transportados correias 36"	16	25	390	1015	31615	23575,306
Transportados correias 48"	10	16	850	1460	31860	23758,002
Transportados correias 60"	8	8	530	540	8560	6383,192
Correia refrigeração	2	2	120	150	540	402,678
TOTAL					174069	129.803,3

Para estimar a energia consumida a partir da potência dos equipamentos, estima-se primeiramente a quantidade de horas de funcionamento, admitindo o valor dado para sua produção, de 1.800 t/h para a britagem primária e 1.080 t/h para a rebitagem (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977). Como são duas margens, estas capacidades no total são de 3.600 t/h para a britagem primária e 2.160 t/h para a britagem secundária.

Uma vez que não possuímos o fluxograma detalhado de quais equipamentos funcionam para a produção de cada tipo de brita, será admitido que toda a estrutura das centrais de britagem, exceto os britadores, funciona para todas as britas. Quanto aos britadores primários, estes também funcionam para todas as britas. Já os britadores secundários funcionam apenas para as britas 1, 2 e 3, os britadores terciários apenas para as britas 1 e 2 e os britadores quaternários apenas para as britas 1.

As quantidades de brita produzidas são dadas pela empresa (MESCOLIN, 2002):

- brita 1: 7.716.884,22 t;
- brita 2: 4.596.625,14 t;
- brita 3: 3.579.481,84 t, e
- brita 4: 2.821.102,96 t.

Desta forma, e considerando as produtividades apresentadas, temos que o tempo de funcionamento dos britadores pode ser estimado por:

- britador primário: 5.198 h;
- britador secundário: 7.358 h;
- britador terciário: 5.701 h, e
- britador quaternário: 1.306 h.

Se considerarmos que os britadores trabalham simultaneamente, podemos dizer que os demais equipamentos trabalham pelo maior destes períodos, ou seja, 7.358 h. Aplicando estes valores de tempo às potências dos equipamentos, temos os consumos elétricos apresentados na Tabela D.37.

Tabela D.37- Estimativa de consumo elétrico na britagem.

Equipamento		Tempo Funcionamento (h)	Potência (kW)	Consumo (kWh)
Britador	1°	5.198	1.640,54	8.527.526,92
	2°	7.358	1.789,68	13.168.465,44
	3°	5.701	1.789,68	10.168.465,44
	4°	3.573	4.772,48	17.052.071,04
Demais equipamentos		7.358	119.810,92	881.568.405,74
TOTAL				930.391.272,11

Desta forma, estima-se o consumo elétrico na britagem como sendo de 930.391.272 kWh.

- *concreto*

De acordo com a referência (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977), para as centrais de britagem foram consumidas as seguintes quantidades de concreto nas fundações:

- ME: 14.700 m³;
- MD: 12.000 m³;

Somando estes dois valores, chega-se ao total: 26.700 m³.

c. central de refrigeração

- *peso em aço*

De acordo com a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977), nas centrais de refrigeração do canteiro de obras de Itaipu existiam os equipamentos apresentados na Tabela D.38.

Tabela D.38- Peso das estruturas das centrais de concreto (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

	Quantidade				Peso Unitário (t)				Peso Total (t)
	CR-1	CR-2 a	CR-2 b	CR-3	CR-1	CR-2 a	CR-2 b	CR-3	
Compressores									
S1+S2	3	2	0	0	2,9	15,15	0	0	39
S3+S4	5	2	2	3	2,65	15,15	5,24	7,4	76,23
Reserva	1	1	0	1	2,65	15,15	0	7,4	25,2
Condensadores	6	5	0	2	22	23,2	0	11,5	271
Depósitos NH3	2	2	0	1	5,6	5,2	0	2,7	24,3

(continua)

Tabela D.38- (continuação)

	Quantidade				Peso Unitário (t)				Peso Total (t)
	CR-1	CR-2 a	CR-2 b	CR-3	CR-1	CR-2 a	CR-2 b	CR-3	
Separadores Líquidos									
S1+S2	1	1	0	0	11,85	11,85	0	0	23,7
S3+S4	2	2	0	2	6,4	4,9	0	2,9	28,4
Vazo pressão S3 e S4	1	2	0	1	2,3	4,9	0	2,6	14,7
Bombas Amoníaco									
S1+S2	3	3	0	0	0,1	0,1	0	0	0,6
S3	3	3	0	2	0,09	0,07	0	0,07	0,62
S4	2	2	0	2	0,09	0,07	0	0,07	0,46
Torres Arrefecimento	1	1	0	1	64,8	58,7	0	13,7	137,2
Bomba circ. água	1	1	0	0	30	28,8	0	0	58,8
Evaporadores sist. SL	30	30	0	0	3,25	3,25	0	0	195
Evaporadores sist SZ	3	3	0	0	3,25	3,25	0	0	19,5
Evaporadores sist S3	3	2	0	1	18,5	18,5	0	18,5	111
Fabricação Gelo									
Máquina gelo	27	18	0	9	3,85	3,85	0	3,85	207,9
Sist. Rake	3	2	0	1	5	5	0	5	30
Transportadores	1	1	0	1	6	5	0	1	12
Estrutura	1	1	0	1	400	300	0	200	900
TOTAL									2.175,61

De acordo com esta estimativa, o peso em aço existente era de 2.176 t, como indicam os cálculos acima.

- *consumo elétrico*

A estimativa do consumo elétrico das centrais de refrigeração será realizada em separado para cada um dos quatro sistemas existentes. No entanto, primeiramente se apresenta na Tabela D.39 as potências instaladas para cada um deles, em cada central (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

Tabela D.39- Potência instalada nas centrais de refrigeração, por sistema (ITAIPU BINACIONAL, 1994)

	CR-1 (kW)	CR-2 (kW)	CR-3 (kW)	Total (kW)
Água fria para agregados (S1)	6.395	6.395	0	12.790
Água fria para concreto (S2)	990	660	330	1.980
Ar frio para agregados graúdos (S3)	2.800	1.870	935	5.605
Produção gelo (S4)	2.800	1.870	935	5.605
Reservatórios	2.790	4.050	880	7.720
TOTAL	15.775	14.845	3.080	33.700

Utilizando estes valores, podemos estimar o consumo elétrico de cada sistema:

- *sistema S1: produção de água fria para os agregados*

Para estimar o consumo elétrico deste sistema, realizaremos uma aproximação do calor retirado das britas pela água fria, e admitiremos essa energia como sendo dissipada nos evaporadores, de modo a obter um valor para o tempo de funcionamento.

O calor retirado dos agregados pode ser estimado por meio de balanço térmico, utilizando a equação:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$$

, onde:

- Q= calor retirado dos agregados (kJ), a ser calculada;
- m= massa dos agregados (kg), de ITAIPU BINACIONAL (MESCOLIN, 2002);
- c= calor específico agregados (kJ/kg.°C), de ITAIPU BINACIONAL (1994);
- T₂= temperatura de saída dos agregados (°C), de REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977);
- T₁= temperatura de entrada dos agregados (°C), de REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977);

Admitindo a temperatura ambiente de 30° C, e o calor específico das britas como 0,84 kJ/kg.°C (ITAIPU BINACIONAL, 1994), temos os valores apresentados na Tabela D.40.

Tabela D.40- Balanço térmico do sistema de produção de água fria para os agregados (S1)

	Quantidade para resfriar (kg)	Calor Específico (kJ/kg.°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Dif. Temp . (°C)	Energia (kJ)	Energia (kcal)
Brita 1	7.716.884.220	0,84	30	6	24	155.572.385.875	37.150.685.743
Brita 2	4.596.625.139	0,84	30	7	23	88.806.797.676	21.207.063.285
Brita 3	3.579.481.841	0,84	30	8	22	66.148.824.412	15.796.339.270
Brita 4	2.821.102.961	0,84	30	9	21	49.764.256.232	11.883.704.388

Somando toda a energia, temos um total de 86.037.792.686 kcal. Considerando que esta energia deve ser dissipada nos evaporadores, que possuem capacidade unitária de 17.500 kcal/h, sendo 60 evaporadores (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA,

1977), a capacidade total de troca de calor é de 1.050.000 kcal/h, o que resulta num total de 81.940,75 horas de funcionamento do sistema S1.

Uma vez que este sistema possui uma potência instalada de 12.790 kW, temos a estimativa de um consumo elétrico de 1.048.022.192 kWh pelo sistema S1.

- *sistema S2: produção de água fria para amassamento do concreto*

A primeira estimativa referente a este sistema diz respeito à quantidade de água a ser resfriada. Considerando a proporção estimada de 170 kg água/m³ concreto e a quantidade de 12.694.430,2 m³ de concreto (MESCO LIN, 2002), temos um consumo de água de 2.158.053,14 t. Deve-se notar que parte desta água resfriada segue para o sistema S4, para produção de gelo em escamas, e parte é utilizada diretamente.

Utilizando a mesma equação de balanço térmico do sistema S1, e considerando o dados de projeto (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977) de 22°C de diferença de temperatura, podemos estimar o calor a ser retirado como 47.477.169.168 kcal.

Para estimar o tempo de funcionamento no entanto, é necessário considerarmos a capacidade dos 6 trocadores de calor, de 283.500 kcal/h cada (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977), resultando numa capacidade de 1.701.000 kcal/h.

Desta forma, o tempo necessário de funcionamento do sistema S2 é estimado em 27.911 horas. Considerando a potência instalada de 1.980 kW, indicada anteriormente na Tabela D.39, estima-se por fim o consumo elétrico de 55.264.430 kWh.

- *sistema S3: produção de ar frio para resfriamento dos agregados graúdos*

A primeira estimativa neste caso deve ser a da quantidade de calor retirado dos agregados, para o qual se utiliza novamente o balanço térmico usado nos sistemas S1 e S2. Este cálculo é apresentado na Tabela D.41.

Tabela D.41 – Balanço térmico do sistema de produção de ar frio para refrigeração dos agregados graúdos (S3)

	Quantidade para resfriar (kg)	Calor Específico (kJ/kg/°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Diferença Temp. (°C)	Energia (kJ)	Energia (kcal)
Brita 2	4.596.625.139	0,84	7	-2	9	34.750.486.047	8.298.416.068
Brita 3	3.579.481.841	0,84	8	-7	15	45.101.471.190	10.770.231.320
Brita 4	2.821.102.961	0,84	9	-2	11	26.066.991.360	6.224.797.537
Total							25.293.444.925

Considerando que o sistema possui 6 trocadores de calor, de capacidade 800.000 kcal/h cada, temos uma capacidade de 4.800.000 kcal/h. Desta forma, são necessárias 5.269 horas de funcionamento do sistema S3.

Considerando a potência instalada neste sistema como 5.605 kW, estima-se o consumo elétrico em 29.535.366 kWh.

- *sistema S4: produção de gelo em escamas para o concreto*

Considerando que 80% da água de amassamento é adicionada ao concreto na forma de gelo em escamas (MESCOLIN, 2002), temos uma produção de 1.726.442.508 kg de gelo.

Para estimar o tempo de funcionamento, partimos da produtividade das centrais, calculada na Tabela D.42.

Tabela D.42– Capacidade do sistema de produção de gelo para o concreto (S4) (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)

	Quantidade de trocadores calor	Capacidade Unitária (kg/h)	Capacidade total (kg/h)
CR1	27	900	24.300
CR2	18	900	16.200
CR3	9	900	8.100
TOTAL			48.600

Desta forma, pode-se estimar o tempo de funcionamento do sistema S4 em 35.523,5 horas, o que considerando a potência anteriormente apresentada de 5.605 kW resulta numa estimativa de consumo energético de 199.109.265 kWh.

- *consumo elétrico total das centrais de refrigeração*

Cabe dizer, antes de consolidar esta estimativa, que ainda resta estimar o consumo energético da armazenagem de água e gelo. Porém como não há dados suficientes para estes cálculos este valor não será incluído aqui. Fica no entanto registrada a necessidade de, num estudo mais detalhado, calcular este valor.

Somando os valores estimados para os quatro sistemas, temos o total apresentado na Tabela D.43.

Tabela D.43 – Estimativa de consumo energético das centrais de refrigeração.

Sistema	Consumo Estimado (kWh)
S1	1.048.022.192
S2	55.264.430
S3	29.535.366
S4	199.109.265
SOMA	1.331.931.253

- *concreto*

Segundo dados da referência utilizada (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977), para as fundações das centrais de refrigeração utilizou-se as seguintes quantidade de concreto:

- ME: 3.400 m³;
- MD: 4.000 m³;

Somando estes valores, chega-se ao total de 7.400 m³.

d. central de concreto

- *peso em aço:*

De acordo com a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977), são três centrais idênticas em cada margem, com os equipamentos descritos na Tabela D.44.

Tabela D.44 – Estimativa do peso dos equipamentos da central de concreto (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

Equipamentos	Massa (t)	
	cada central	6 centrais
Estrutura de suporte, moegas, silos agregados, escada acesso	187	1122
Elevadores de caneca	20	120
Conj. Parafusos transportadores	4	24

(continua)

Tabela D.44- (continuação)

Equipamentos	Massa (t)	
	cada central	6 centrais
Compressor de ar	1,8	10,8
Reservatório de gelo	1,5	9
Conj. Balanças	12,2	73,2
Chute giratório	3	18
Conj Betoneiras	31,2	187,2
Silos de cimento e cinzas	-	457,5
TOTAL	212,8	1.276,8

Desta forma, estima-se um total de 1.276,8 t de aço nas centrais de concreto.

- *consumo elétrico:*

Para estimar o consumo elétrico das centrais de concreto parte-se da potência dos equipamentos, apresentada na Tabela D.45.

Tabela D.45 – Potência dos equipamentos das centrais de concreto (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

	Quantidade por Central	Potência Unitária (HP)	Potência Total (HP)	Potência Total (kW)
Elevador de canecas	2	20	240	178,968
Parafuso transportador (C1, C2 e C3)	2	10	60	44,742
Parafuso transportador (C4, C5 e C6)	3	10	180	134,226
Distribuidor de agregados	1	0,5	3	2,2371
Chute giratório betoneira	1	1	6	4,4742
Betoneiras	4	40	960	715,872
Bomba hidráulica betoneira	4	10	240	178,968
Coletores de pó	2	5	60	44,742
Parafuso de gelo	1	15	90	67,113
Reservatório	1	10	60	44,742
Compressor de ar	1	50	300	223,71
Bomba de aditivos	2	0,75	9	6,7113
TOTAL			2208	1646,506

Tendo a potência instalada, estima-se o tempo de funcionamento, tendo em vista a produção nominal de concreto de 180 m³/h em cada central (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977). Desta forma, com uma produção total de 1.080 m³/h, e um volume de concreto de 12.694.430,2 m³ (MESCOLIN, 2002), temos 11.754,1 horas de funcionamento das centrais.

Com a potência estimada na Tabela D.45, de 1.646,5 kWh, estima-se para as centrais de concreto um consumo elétrico total de 19.353.195 kWh..

- *concreto:*

Segundo a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977) para as fundações das centrais de concreto foram consumidas as seguintes quantidades de concreto:

- ME: 2.300 m³;
- MD: 2.500 m³;

Somando estas quantidades, estima-se um total de 4.800 m³ de concreto nas centrais de concreto.

Lançamento do concreto

O lançamento de concreto em Itaipu foi realizado por meio de dois tipos de sistemas: cabos aéreos e guindastes de torre, este utilizado onde os cabos não acessavam. Para alimentação do concreto das centrais até estes, era utilizada uma monovia. A seguir estimam-se os consumos para estes três sistema.

e. monovias

- *peso em aço:*

De acordo com a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977), as monovias possuíam os equipamentos apresentados na Tabela D.46.

Tabela D.46 – Peso dos equipamentos das monovias (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)

	Massa (t)		
	ME	MD	TOTAL
Estruturas metálicas e caminho rolamento	2024	1620	3644
Mecanismo desvio	162	135	297
Carros da monovia	128	92	220
Carros de transferência	52,5	52,5	105
TOTAL	2366,5	1899,5	4.266

Conforme indicado acima, estes representam um peso total de aço de 4.266 t.

- *consumo elétrico:*

Novamente a primeira estimativa a ser feita neste caso é a da potência instalada nas monovias, apresentada na Tabela D.47.

Tabela D.47 – Potência dos equipamentos das monovias (adaptado de REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)

Equipamento	Quantidade		Potência Unitária (HP)	Potência Unitária (kW)	Potência Total (kW)
	ME	MD			
Potência instalada central	1	1	-	1.200+ 990	2.190
Carros da monovia	32	23	-	12,6	693
Caçamba hidráulica	32	23	15	11,2	616
Carros Transferência-sist translação	7	7	20	14,9	208,6
Carros Transferência-sist hidráulico	7	7	15	11,2	156,8
Mecanismo de desvio	12	10	-	4,4	96,8
TOTAL					3.961,2

De posse desta potência, estima-se o tempo de funcionamento, considerando a quantidade de concreto produzida, de 12.694.430,2 m³ (MESCOLIN, 2002). Sendo a capacidade das monovias: de:

- ME: 540 m³/h;
- MD: 360 m³/h;

, temos um total de 900 m³/h. Esta capacidade resulta em um tempo funcionamento de 14.104 horas.

Por sua vez, considerando a potência estimada na Tabela D.47, de 3.961 kW, obtém-se um consumo elétrico de 55.865.944 kWh nas monovias.

- *consumo concreto:*

Segundo a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977), as monovias consumiram as seguintes quantidades de concreto:

- ME: 8.000 m³;
- MD: 6.000 m³;

Somando estes valores chega-se a um total de 14.000 m³ de concreto.

f. cabos aéreos

- *peso em aço:*

O conjunto dos sete cabos aéreos utilizados para a concretagem de Itaipu possuíam no total as quantidades de aço indicadas na Tabela D.48.

Tabela D.48 – Peso dos equipamentos dos cabos aéreos (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)

Equipamento	Quantidade	Massa Unitária (t)	Massa total (t)
Caçambas 6 m ³	21	3,5	73,5
Caçambas 3 m ³	12	2,1	25,2
Cabo aéreo 95m altura	4	680	2.720
Cabo aéreo 110 m altura	3	773	2.319
Trilhos e fixação caminho rolamento	1	439	439
Cabo portante	7	100	700
Moitão subida/ descida caçamba	7	20	140
TOTAL			6.416,7

Conforme indicado, a quantidade total de aço nos cabos aéreos é de 6.417 t.

- *consumo elétrico:*

De acordo com a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977), a potência instalada nos casbos aéreos é dada segundo a Tabela D.49.

Tabela D.49 – Potência dos equipamentos dos cabos aéreos (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)

Equipamento	Quantidade por unidade	Potência unitária (kW)	Total (kW)
Grupo de Elevação	1	480,00	3.360,00
Translação do carro	1	480,00	3.360,00
Motor dos anéis	1	940,00	6.580,00
Motor Elevação	1	440,00	3.080,00
Motor translação carros	1	445,00	3.115,00
Motor Apoios em A	4	11,50	322,00
Motor contra-carros	4	8,00	224,00
TOTAL			20.041,00

Para estimar o tempo de funcionamento deste sistema, devemos considerar uma capacidade de transporte dos cabos de 108 m³/ h, para cada um (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977), resultando um total de 756 m³/h.

Uma vez que, segundo a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977), 80% do concreto foi transportado por cabos, e que de acordo com informações da Itaipu Binacional (MESCOLIN, 2002), foram transportados 12.694.430,2 m³ de concreto, tem-se que os cabos aéreos transportaram 10.155.544,16 m³ de concreto.

Considerando a capacidade estimada, resulta que o sistema dos cabos operou por cerca de 13.433,25 horas. Aplicando a potência estimada na Tabela D.49, de 20.041 kW, estima-se um total de consumo elétrico de 269.215.953 kWh no sistema dos cabos.

- *consumo concreto:*

De acordo com a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977), foram usados 14.600 m³ de concreto nas fundações dos cabos aéreos.

g. guindaste de torre

- *peso em aço:*

Para os guindastes de torre, a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977) fornece os valores de aço fornecidos pela Tabela D.50.

Tabela D.50– Peso dos equipamentos dos guindastes de torre (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977).

Equipamentos	Quantidade	Massa Unitária (t)	Massa total (t)
Guindaste completo	8	223	1784
Contrapeso	8	102	816
TOTAL			2.600

Conforme a estimativa acima, os guindastes de torre consumiram um total de 2.600 t em aço.

- *consumo elétrico:*

Quanto a potência instalada, são apresentados os valores da Tabela D.51.

Tabela D.51 – Potência dos equipamentos dos guindastes de torre (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1977)

Equipamentos	Quantidade por unidade	Potência unitária (kW)	Total (kW)
Grupo ward-leonard	1	181,00	1.448,00
motor elevação	1	148,00	1.184,00

(continuação)

Tabela D.51- (continuação)

Equipamentos	Quantidade por unidade	Potência unitária (kW)	Total (kW)
motor lança	1	114,00	912,00
motor giro	4	9,00	288,00
motor locomoção	4	12,00	384,00
TOTAL			4.216,00

De modo análogo aos cabos, temos uma capacidade de transporte unitária para os guindastes de 60 m³/h, que resulta numa capacidade total de 480 m³/h. Sendo que os 20% restantes de todo o concreto é transportado pelos guindastes, temos uma quantidade transportada de 2.538.886,04 m³.

Aplicando a capacidade de transporte acima, chega-se a um tempo de funcionamento de 5.289,3 horas, que para a potência estimada de 4.216 kW significa um consumo elétrico de 22.299.882 kWh.

- *consumo concreto:*

Os valores apresentados pela REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1977) para consumo de concreto pelos guindastes é de:

- ME: 600 m³;
- MD: 1.000 m³;

Somando-os, chega-se num total de 1.600 m³.

h. consolidação dos valores do canteiro

Consolidando os valores estimados neste anexo, temos os valores totais para o canteiro dados na Tabela D.52.

Tabela D.52- Estimativas de consumos para o canteiro

Instalação	Peso em Aço (t)	Consumo Elétrico (kWh)	Consumo Concreto (m ³)
Centrais de ensilagem	1.109	18.868.760	2.000
Centrais de britagem	6.120	930.391.272	26.700
Centrais de refrigeração	2.176	1.331.931.253	7.400
Centrais de concreto	1.277	19.353.195	4.800
Monovias de concreto	4.266	55.865.944	14.000
Cabos aéreos	20.041	269.215.953	14.600
Guindaste de torre	2.600	22.299.882	1.600
TOTAL	37.588	2.647.926.259	71.100

i. comentários sobre as limitações destas estimativas

As estimativas feitas nesta Anexo possuem o propósito de avaliar as contribuições do canteiro nos consumos totais da obra de Itaipu. Deve-se considerar que os equipamentos utilizados foram ao final da obra destinados alguns para a venda, alguns para a recuperação como sucata. Desta forma, alocar este consumo de aço totalmente para a usina é em si uma super-estimativa.

Outro fator que agrega um erro para a super-estimativa é a hipótese de que todo o peso do equipamento é composto de aço. Esta simplificação, realizada com fins de permitir cálculos com o atual estágio de informações disponíveis, não considera o uso de outros materiais, e foi realizada pois acredita-se que na verdade a contribuição mássica de outros materiais neste tipo de equipamento é mínima, à exceção talvez dos trocadores de calor (que podem possuir quantidades significativas de outros metais como o cobre) e das câmaras de refrigeração, com relevantes pesos em madeira e isolante térmico.

Além disso, é digno de nota que as estimativas de consumo energético são muito simplistas, e que para ter-se valores mais precisos seria necessário um estudo a fundo de cada configuração dos sistemas e processos, principalmente nos pontos de maior consumo, as centrais de refrigeração e britagem.

D.4.3 Iluminação da obra

A obra de Itaipu trabalhou por cerca de dez anos em regime de três turnos, ou seja, 24 h/dia (ANDRIOLO, 2002), o que levou à montagem de um sistema de iluminação noturna. De início, este se mostrou ineficiente, segundo relato do Eng. Isac Roisenblatt, da Philips, responsável pelo projeto (ROISENBLATT, 2003). Após este fato, de acordo com o engenheiro, decidiu-se realizar um projeto especial para a obra, visando o atendimento às normas internacionais de iluminação de áreas externas de trabalho intenso, de modo não apenas a garantir a segurança dos operários mas também a produtividade do canteiro no período noturno. Fez-se então um projeto dinâmico, onde a iluminação acompanhava as mudanças constantes de *lay-out* do canteiro, e que acabou sendo premiado internacionalmente pela sua qualidade e resultados (REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA, 1981).

Segundo ANDRIOLO (2002), este sistema funcionou por dez anos, com cerca de 11 h/ dia de operação em média, o que leva ao questionamento do consumo elétrico e sua relevância.

De modo a avaliar pelo menos a ordem de grandeza deste consumo, realiza-se nesta parte do Anexo uma estimativa muito grosseira, porém a melhor possível com os dados disponíveis, do consumo elétrico com a iluminação do canteiro de Itaipu.

De acordo com o responsável pelo projeto (ROISENBLATT, 2003), o sistema inicialmente era baseado em lâmpadas de vapor de mercúrio, que além da vida curta e baixa eficiência energética apresentavam foco distorcido para grandes distâncias, como muitas vezes se fazia necessário na obra. Além disso, possuíam a desvantagem de que, em caso de desligamento (por queda de tensão, por exemplo, muito comum no canteiro, *sic*), só podiam ser ligadas novamente após meia hora, o que prejudicava em muito a produtividade e segurança no canteiro.

Segundo dados do engenheiro, no novo projeto utilizou-se primordialmente lâmpadas de vapor de sódio, de 1.000W tubulares, com 130 lm/W e vida de aproximadamente 10.000 horas. Para direcionar seus fechos, utilizou-se dois tipos de projetores, de fecho fechado para grandes distâncias, e de fecho médio para pequenas.

Além destas, segundo ROISENBLATT (2003), ainda havia complementação por lâmpadas de vapor de mercúrio de 400W, que seguiam sendo utilizadas em proporção de 1/3 do total, para regiões pequenas com iluminação local. Segundo estimativas da REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1981), o projeto era composto por cerca de 4.000 pontos de luz.

De modo a estimar a energia consumida, faz-se a simplificação a seguir:

- número de pontos de luz: 4.000;
- potência das lâmpadas: 2/3 das lâmpadas de 1.000W, e 1/3 das lâmpadas de 400W;
- funcionamento: 11 h/dia, 10 anos de obra = 40.150 h;
 - consumo = $(40.150) \times 4.000 \times [(1/3 \times 400 + 2/3 \times 1000)] = 128,48.10^6$ Wh.

Ou seja, pelos valores levantados, estima-se o consumo elétrico na iluminação do canteiro em 128,5 MWh.

D.5 Equipamentos Permanentes

Conforme exposto no Capítulo 3.2, de revisão bibliográfica, uma usina hidrelétrica se compõe basicamente de um reservatório, uma barragem e uma casa de força. A água é represada no reservatório, formado pela interferência da barragem no leito natural do rio, e segue para a casa de força onde transfere energia mecânica para uma turbina, que acoplada a um gerador gera eletricidade, que vai alimentar um transformador ligado a uma subestação elétrica, de onde a energia segue para a rede. Para que toda esta transformação seja efetuada são necessários diversos equipamentos mecânicos como a turbina, elétricos como o transformador ou mistos, como os geradores. São os chamados genericamente de *equipamentos eletromecânicos*. Além destes existem muitos outros, imprescindíveis também à operação da usina com segurança e precisão, como comportas, condutos metálicos, elevadores, pórticos, stop-logs, etc. De modo a designar tanto os equipamentos eletromecânicos como estes últimos, utiliza-se a alcunha de *equipamentos permanentes*, que se justifica por não serem estes disponibilizados ao final da obra.

Uma vez que estes equipamentos são incorporados à usina, cabe considerar o consumo de materiais para sua fabricação. Desta forma, nesta parte do Anexo procura-se avaliar os equipamentos permanentes de Itaipu e as massa de seus principais constituintes, a saber: aço, cobre, óleo de transformador e óleo lubrificante.

A primeira constatação importante nesta estimativa é a total ausência na literatura de uma relação completa dos equipamentos permanentes da usina. Embora diversas características técnicas sejam apresentadas para os principais equipamentos, em nenhum documento foi encontrado um valor consolidado total, que afirmasse com convicção o peso total dos equipamentos presentes na usina. Este fato é relevante principalmente se considerarmos a grande quantidade de pequenos equipamentos, como tubos, bombas, válvulas, registros, portões e portas metálicas, etc, que podem ou não serem significativos em termos mássicos, mas para os quais não se possui uma estimativa.

Desta forma, decidiu-se levantar os valores encontrados nas principais referências encontradas, realizando ao final uma consolidação com os dados julgados como mais confiáveis.

Cabe dizer que, uma vez que o peso dos principais equipamentos (turbinas, geradores e transformadores) são mais fáceis de identificar, em diversos casos buscou-se isolar estes dos demais, obtendo estimativas em separado para os equipamentos ditos auxiliares, como pode ser visto nas Tabelas D.54 e D.55, por exemplo.

A seguir apresentam-se os valores obtidos em diversas referências.

D.5.1 Valores apresentados pela ITAIPU BINACIONAL (1989):

A presente referência apresenta os equipamentos dos quais se ocupa a equipe de manutenção da empresa. Admitindo que estes tem responsabilidade sobre todos os equipamentos eletromecânicos da usina, temos a relação destes como apresentado na Tabela D.53.

Tabela D.53- Relação dos equipamentos permanentes da usina (ITAIPU BINACIONAL, 1989)

Equipamento	Quant.	Características
Unidades geradoras	18	
Transformadores	244	Potências desde 0,75 a 375 MVA, e tensões na alta de 18 a 525 kV
Bombas hidráulicas	380	Bombas de água e óleo (diesel, de transformadores, hidráulico)
Ventiladores	552	Para exaustão de ar, com vazões unitárias de até 92.700 m ³ /h.
Trocadores de calor	895	Para trocas ar/ água, água/ água e água óleo
Pontes rolantes	16	2 de 100 kN, 2 de 1MN, 8 de 2,5 MN e 4 de 10 MN.
TC	519	25 em 13,8kV, 18 em 18 kV, 9 em 66kV, 38 em 220 kV e 429 em 500 kV.
Disjuntores	318	237 de 13,8 kV, 36 de 18 kV, 16 de 66 kV, 29 de 220 kV e 347 de 500 kV.
Bancos de baterias	57	
Painéis elétricos	753	

Esta relação apenas fornece uma ordem de grandeza relativa à quantidade de alguns equipamentos, e a faixa de dimensões que este podem atingir.

D.5.2 Valores apresentados pela CAVALCANTI (1979)

Esta referência por sua vez apresenta os equipamentos que foram transportados até o canteiro, numa estimativa realizada em 1979, logo no início das obras. Os valores apresentados encontram-se na Tabela D.54.

Tabela D.54– Estimativa de peso dos equipamentos eletromecânicos (CAVALCANTI, 1979)

Equipamento	Peso estimado (mil t)
Turbinas	59,4
Geradores	57,6
Transformadores	19,6
Equipamentos mecânicos (stop-logs, comportas, condutos, pontes rolantes, grades, etc)	64,7
Equipamentos auxiliares	5,3
TOTAL	206,6

Se isolarmos os valores referentes aos geradores, turbinas e transformadores, temos uma aproximação para os demais equipamentos, como mostra a Tabela D.55.

Tabela D.55– Estimativa de peso dos equipamentos eletromecânicos, exceto geradores, turbinas e transformadores (CAVALCANTI, 1979)

Equipamento	Peso estimado (mil t)
Equipamentos mecânicos (stop-logs, comportas, condutos, pontes rolantes, grades, etc)	64,7
Equipamentos auxiliares	5,3
TOTAL	70,0

Deve-se ressaltar no entanto que esta é uma estimativa realizada em 1979, no início das obras, e portanto preliminar à fabricação dos equipamentos.

D.5.3 Valores apresentados pelo Relatório Anual de 1981 (ITAIPU BINACIONAL, 1982)

Este relatório relaciona os equipamentos permanentes da usina como descrito na Tabela D.56.

Tabela D.56– Estimativa de peso dos equipamentos eletromecânicos (ITAIPU BINACIONAL, 1982)

Equipamento	Peso (t)
Comportas da estrutura de desvio	6.600
Comportas do vertedouro	7.100
Comportas ensecadeiras	3.600
Comportas da tomada d'água	420
Stop-logs, grades etc tomada d'água	8.800
Tubo sucção	180
Pré-distribuidor	420
Caixa espiral	600
Curva final do conduto	820

(continua)

Tabela D.56- (continuação)

Equipamento	Peso (t)
Revestimento do poço	65
Conduto forçado	1.450
Transformadores principais	500
Sub-estação SF ₆	150
Subestação MD	3.000
Comportas, stop-logs e grades restantes	34.000
Turbinas	60.000
Geradores	40.000
Linhas transmissão	1.500
Outros equipamentos	50.000
TOTAL	219.205

Se retirarmos todos os valores contabilizados como peças do gerador, das turbinas, conduto forçado e dos transformadores principais, temos o peso dos demais equipamentos, como apresenta a Tabela D.57.

Tabela D.57– Estimativa de peso dos equipamentos eletromecânicos sem turbinas, geradores, transformadores e condutos (ITAIPU BINACIONAL, 1982)

Equipamento	Peso (t)
Comportas da estrutura de desvio	6.600
Comportas do vertedouro	7.100
Comportas ensecadeiras	3.600
Comportas da tomada d'água	420
Stop-logs, grades etc da tomada d'água	8.800
Sub-estação SF ₆	150
Subestação MD	3.000
Comportas, stop-logs e grades restantes	34.000
Linhas transmissão	1.500
Outros equipamentos	50.000
TOTAL	115.170

Esta estimativa, por sua vez, foi realizada em 1982, com o projeto e manufatura dos equipamentos parcialmente realizados.

D.5.4 Valores apresentados pela ITAIPU BINACIONAL (1994)

Os valores desta referência deveriam ser, pelo menos em tese, os mais confiáveis, pois foram publicados após a conclusão da obra. No entanto, a referência consiste numa descrição da obra parte a parte, sem detalhar ou relacionar claramente os equipamentos. Por este motivo não se sabe se inclui a totalidade dos equipamentos. Além do mais, não apresenta o peso da maior parte dos equipamentos pequenos.

No entanto considerou-se importante apresentar a disposição e algumas características dos equipamentos relacionados, uma vez que esta informação pode vir ser de grande utilidade em estudos futuros que detalhem os equipamentos existentes na usina.

Desta forma, as Tabelas D.58, D.59 e D.60 a seguir apresentam os dados identificados ao longo da referência dos equipamentos permanentes em cada estrutura de Itaipu, respectivamente no vertedouro, barragens e casa de força. Se observarmos a relação dada anteriormente (ITAIPU BINACIONAL, 1989) veremos que este levantamento está incompleto, mas podemos utilizá-lo para orientar nossa estimativa.

Tabela D.58- Dados de equipamentos do Vertedouro (ITAIPU BINACIONAL, 1994)

Componentes		Dados	Peso
Comportas	Comportas	<ul style="list-style-type: none"> • 14 comportas tipo radial, de 20m largura x 21,34m altura; • Peso de cada comporta: • Sem partes fixas: 318,5 t; • Braço: 5,2 t; • Sistema vedação em borracha; • Fabricadas por Badoni-ATB, Ishibras e Coemsa; 	14.(318,5+5,2) = 4.531,8 t
	Mecanismo hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> • Dois servomotores por comporta, acionados pelo sist. Hidráulico; • Servomotores com óleo: 14,2 t; • Uma bomba de óleo para cada duas comportas; • São 7 conjuntos de: tanque óleo (4.000 l), motor e bomba (114 l/min, 1440 N/cm²), válvulas; 	14.2.14,2= 397,6 t (óleo incluído, mas não a bomba, motor e válvulas)
	Pórtico móvel (gantry crane)	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade 785 kN; • Peso (sem vigas de elevação): 87,9 t; 	87,9 t
	Caminho de rolamento	<ul style="list-style-type: none"> • 335 m de extensão; 	*
	Stop-logs	<ul style="list-style-type: none"> • 2 jogos de stop-logs colocados sobre trilhos ao longo vertedouro; • Cada um tem 6 painéis, pesando o stop-log 382,8 t; 	2.382,8= 765,6 t
	Viga elevação	<ul style="list-style-type: none"> • Para cada conjunto uma viga de elevação de 11,92 t; 	2.11,9= 23,8 t
Equip. auxiliares	Sistema de ventilação	<ul style="list-style-type: none"> • Admissão de ar para sala diesel e das baterias; • Exaustão ar para sala baterias, cozinha, WCs e planta tratamento esgotos; • Uso ventiladores; 	*
	Estação tratamento de esgoto	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de 3.850 l/dia; • Proveniente dos WCs, para tanque séptico (7,44 m³) -aplicação de cloro antes de descarregar ; 	*
	Sistema de água potável	<ul style="list-style-type: none"> • Proveniente da ETA 1 (barragem principal); • Tanque 8m³ armazena e distribui; 	*
	Painel controle		
	Energia DC	<ul style="list-style-type: none"> • 2 baterias DC, 125 V com carregador; • 2 geradores diesel de 200 kVA- 460 V, com reservatórios diesel; 	*
	Sub-estação	<ul style="list-style-type: none"> • 2 transformadores 500 kVA secos; 	*
	Elevadores	<ul style="list-style-type: none"> • 2 de 25 passageiros ou 1,75 t; 	*
TOTAL			5.806,70 t

*- Sem valor apresentado nas referências consultadas.

Tabela D.59 Dados de equipamentos da Barragem de Concreto (ITAIPU BINACIONAL, 1994)

Componentes		Dados	Peso
Adução	Condutos forçados	<ul style="list-style-type: none"> • 18, de placas de aço soldadas, diâm. 10,5 m e espessura de 25 a 42 mm; • Parte superior ancorada na barragem, e o resto exposto; • Cada um tem três suportes de aço na parte exposta; • Peso de cada conduto: 883 t ; • Apoios dos condutos: 1.000 t; • Fabricação: Badoni-ATS e Ind. Metal Mecânica; 	$= (18 \times 883) + 1.000 = 16.894 \text{ t}$
	Grade	<ul style="list-style-type: none"> • 18, de aço soldado; • 24 painéis cada; • Fabricantes: Badoni, Ishibras, Coemsa e CIE; 	*
	Limpa-grade	<ul style="list-style-type: none"> • 2 limpa-grades de capacidade 200kN cada; • peso de cada completo: 83,87 t; • Projeto e fabricação: Bardella S.^a (SP); 	$= 2 \times 83,9 = 167,8 \text{ t}$
	Comporta	<ul style="list-style-type: none"> • 18, tipo fixed-wheel, 19,25m de altura; • 242,0 t cada; • Fabricantes: Mecanica Pesada, Bardella, BS Ind. Mec. E BVS- Neyrpic (França); 	$= 18 \times 242,0 = 4.356 \text{ t}$
	Mecanismo acionamento	<ul style="list-style-type: none"> • Servomotores, externos à barragem; 	
	Stop-logs	<ul style="list-style-type: none"> • são os mesmos usados no desvio. • 3 jogos, cada um com 1 elemento superior e 6 normais; • Peso: cada elemento normal, 119,32 kN; cada elemento superior, 140 kN; • Mesmos fabricantes que comportas; 	$= 3 \times (11,93 + 6 \times (14,0)) = 287,79 \text{ t}$
	Viga elevação	<ul style="list-style-type: none"> • Viga elevação: uma para cada jogo, não tem dado, uso valor do vertedouro (119,2 kN); • Mesmos fabricantes das comportas; 	$= 3 \times 11,92 = 35,76 \text{ t}$
	Pórtico	<ul style="list-style-type: none"> • 2 guindastes de 1,1 MN; • Peso de cada: 186,4 t; 	$= 2 \times 186,4 = 372,8 \text{ t};$
	Caminho de rolamento	<ul style="list-style-type: none"> • 852m de extensão; 	*

(continua)

Tabela D.59- (continuação)

Componentes		Dados				Peso	
Equip. auxiliares	Elevadores	<ul style="list-style-type: none"> • 4 de 20 passageiros (ou 1,4 t)- barr. Principal; • 1 de 14 passageiros (0,98 t)- estrut. Desvio; • 1 de 17 passageiros (1,19 t)- esturt. Desvio; 				*	
	Sistema de drenagem	<ul style="list-style-type: none"> • Retira água infiltrada das fundações,etc; • Ao longo da barragem, são 9 estações de bombeamento, com as seguintes características: 					
		#	Localiz.	n. bombas	Alt. Manom (m)		Vazão(m ³ /min)
		1	Barr. Princ.	4	51		2.1
		2	Barr. Princ.	4	93		3.33
		3	Barr. Princ.	10	113		3.33
		4	Barr. Princ.	4	95		3.56
		5	Barr. Contr. Esq.	2	12		1.5
		6	Barr. Princ.	4	39		5.25
		7	Estr. Desvio	3	94		3.17
8	Barr. Contr. Dir.	2	19	3.00			
9	Estr. Desvio	3	75	1.8			
Sistema ventilação	<ul style="list-style-type: none"> • Ventiladores: Para sala equipamentos (forçada), WC's e estação de bombeamento de esgotos (exaustores automáticos), galerias superiores (natural) e galerias inferiores (forçada); 						
Estação bomb. Esgoto	<ul style="list-style-type: none"> • esgoto dos WCs é bombeado para ETE (na casa de força); 						
ETA 1	<ul style="list-style-type: none"> • Barragem de contrafortes • 2 sistemas: • água potável e sem cloro p/ refrigeração gerador) • máx. de 15 m³/h; • uso de sulfato de alumínio, carbonato de sódio, hiperclorato de sódio • gera resíduos de filtro de areia, filtro de carvão ativado e partículas sedimentadas; • b) Água para sistema de ventilação • menos pura que potável; • máx de 30 m³/h; • mesmos produtos químicos; 						
ETA 2	<ul style="list-style-type: none"> • idem ETA 1; 						

(continua)

Tabela D.59- (continuação)

Componentes		Dados	Peso
Equip. auxiliares	Estação Telecom.		
	Sub-estação elétrica	<ul style="list-style-type: none"> • 2 sistemas separados similares de fornecimento de energia auxiliar, um em 50 e outro em 60 Hz; • Eletricidade vem da casa de força e alimenta principalmente as bombas de drenagem; • Sistema emergência: 4 unidades 125 V dc, com 2 baterias de níquel cádmio cada; 	
	Torres de transmissão 500 kV	<ul style="list-style-type: none"> • 3, na barragem contrafortes, para sub-estação na margem direita; 	

Tabela D.60- Dados de equipamentos da Casa de Força (ITAIPU BINACIONAL, 1994)

Componentes		Dados		
Unidades Geradoras	Turbina	<ul style="list-style-type: none"> • 18 unidades, Francis, 715 MW; • Pesos: 		
		Rotor (runner)	290,20	$= 5 \cdot (290,2 + 125,5 + 237,1 + 2,42 + 78,5 + 4,24 + 581,7 + 842,3 + 180 + 382,5 + 186 + 48 + 30 + 56) + 13 \cdot (290,2 + 125,5 + 237,1 + 2,42 + 78,5 + 4,24 + 581,7 + 842,3 + 180 + 415,8 + 186 + 48 + 30 + 56) = 5 \cdot 3044,46 + 13 \cdot 3077,76 = 55.233,18 \text{ t}$
		Eixo rotor (runner shaft)	125,50	
		Tampa (head cover)	237,10	
		Mancal da tampa (head cover wear ring)	2,42	
		Anel inferior (bottom ring)	78,50	
		Mancal do anel inferior (bottom ring wear ring)	4,24	
		Caixa espiral (spiral casing)	581,70	
		Trecho final conduto forçado (lower bend)	842,30	
		Palhetas diretrizes	180,00	
		Pré-distribuidor palhetas 160 mm (stay ring)	382,50	
		Pré-distribuidor palhetas 200 mm (stay ring)	415,80	
		Tubo sucção (draft tube)	186,00	
		Mecanismo operação	48,00	
Servomotores mecanismo operação	30,00			
Aro de operação	56,00			

(continua)

Tabela D.60- (continuação)

Componentes	Dados				
Unidades Geradoras	Equipamento auxiliar turbina	<ul style="list-style-type: none"> Mecanismo de operação: Mecanismo: 48 t; 2 servomotores: 30 t; Aro de operação: 56 t; Sistema fechamento tubo-sucção: 10 stop-logs, 100t cada; 2 pórticos (140 t capacid.), 240 t cada; 3 vigas de elevação de 5,89 t cada por pórtico; 		$= 18. (48+30+56)+ 10.100+ 2.240+ 2.3.5,89=$ $= 2.412 + 1.000+ 480+ 35,34=$ $=3.927,3 t.$	
	Gerador	<ul style="list-style-type: none"> 18: 9 de 50 Hz, 9 de 60 Hz Fabricação: Brown Boveri (BBC) e Siemens; 		$= 9. 3958,3+$ $9. 3787,9=$ $= 69.715,8 t$	
		Peça	50 Hz	60 Hz	
		Estator (stator)	685,00	608,00	
		Eixo superior (upper shaft)	38,30	37,90	
		Eixo inferior (lower shaft)	117,00	117,00	
		Cruzeta superior (upper bracket)	144,00	144,00	
		Cruzeta inferior (lower bracket)	373,00	373,00	
		Rotor (rotor)	2.020,00	2.020,00	
		Polos (poles)	464,00	371,00	
Anel suporte estator	117,00	117,00			
SOMA	3.958,30	3.787,90			
Equipamento auxiliar gerador	<ul style="list-style-type: none"> Sistema de resfriamento: Por ar, exceto nos windings do estator, por água; Sistema excitação: Circuito elétrico, contém 2 bancos de transformadores- a seco; Sistema de freios- 32 freios de sapata; Barramento isolado: Similar para 50 e 60 Hz, condutor de alumínio com cobertura coaxial, ar no meio- Diâmetros: main bus-1 m; delta bus, 1 m; secundário 0,3 m; Neutro gerador: Conectado ao barramento neutro, contém transformador e switch de desconexão; 		*		

(continua)

Tabela D.60- (continuação)

Componentes	Dados					
Unidades Geradoras	Transformadores	<ul style="list-style-type: none"> • 18 bancos de 3 e mais dois de step-up = 56 no total; • Eleva a tensão do gerador de 18 kV para 500 kV, para sub-estação da usina; • Cada transformador é montado numa base de concreto, tem proteção contra incêndio e sistema de ventilação; • Isolamento à óleo (sistema de óleo do transformador – ver a seguir); • Resfriamento à água, OFWF, com 4 trocadores de calor cada (ver a seguir); • Peso: • Partes removíveis: 130,0/106,0 t (50/60 Hz); • Tanques e acessórios: 41,0/31,5 t (50/60 Hz); • Fabricantes: Brown Boveri e TUSA- Transformadores União, e Coemsa; 				Aço e cobre: 28x (130+ 41)+ 28x(106+31,5)= 8.638 t
	Sub-estação SF ₆	<ul style="list-style-type: none"> • 52 circuit breakers para proteção dos 18 transformadores dos geradores, 2 transf. Auxiliares, 8 linhas aéreas e 4 barramentos; • Fabricante: Brown Boveri; 				
Sistemas auxiliares	Sistema de água resfriamento	<ul style="list-style-type: none"> • Água da caixa espiral das turbinas; • Resfriamento das unidades geradoras, em diversos sistemas da turbina, gerador e transformadores; 				
	Sistema ar comprimido	<ul style="list-style-type: none"> • 2 grupos de 4 compressores; • 2,24 t cada compressor; • Além destes, reservatórios 5m³; 				
	Bombas de drenagem	Local	Sistema	Vazão m³/h	Alt. (m)	Pot. (kW)
		U1	Anti-cheias	545	68,7	150
		U3	Anti-cheias	545	68,7	150
		U5	Retirada d'água turbina e conduto	800	72,5	250
		U7	Drenagem	406	50,4	90
		U8	Drenagem	300	80,7	110
		U9	Drenagem	300	80,7	110
		U10	Retirada d'água turbina e conduto	600	72,5	250
		U12	Anti-cheias	545	68,8	150
U14		Anti-cheias	545	68,8	150	
U15	Drenagem	406	50,4	90		

(continua)

Tabela D.60- (continuação)

Componentes	Dados						
Sistemas auxiliares	Bombas de drenagem	U16	Retirada d'água turbina e conduto	800	72,5	250	
		U17	Drenagem	143	83,2	55	
		U18	Retirada d'água turbina e conduto	800	72,5	250	
		U18A	Anti-cheias	545	68,8	150	
	Elevadores	Locali	Quantidade	Capac. (pessoas)	Capac. (t)		
		U2	1	14	0.98		
		U4	1	17	1.19		
		U6	1	14	0.98		
		U8	1	17	1.19		
		U9A	4	14	0.98		
		U10	1	8	0.56		
		U10	1	17	1.19		
		U13	1	14	0.98		
		U13	1	17	1.19		
		U17	2	17	1.19		
		AMD	2	42	2,94		
		AMC	2	42	2,94		
		<ul style="list-style-type: none"> • Fabricante: Villares; • 2 de carga (30,0 t)- Fabricante: Pohlig-Heckel do Brasil; 					

(continua)

Tabela D.60- (continuação)

Componentes	Dados	
Sistemas auxiliares	Sistema enchimento das turbinas	<ul style="list-style-type: none"> • Mecanismo para encher d'água o tubo sucção, a caixa espiral e o trecho final do conduto forçado, por uma conexão de 500 mm de diâmetro; • Basicamente válvulas e conexões, com acionamento por ar comprimido;
	Sistema de óleo dos transformadores	<ul style="list-style-type: none"> • 2 centros de estocagem e purificação óleo, um em cada área de montagem; • Cada um contém: 2 tanques de estocagem de 85m³ (m de óleo limpo e outro sujo), 2 moto-bombas elétricas , 1 purificador de óleo, painel de controle e tubulação aço inox; • Volumes: • Principal 50 Hz: 49 m³ (43 t); • Principal 60 Hz: 40 m³ (41,5 t); • Auxiliar 50 Hz: 23 m³; • Auxiliar 60 Hz: 22 m³; • Auxiliar 2 50 Hz: 19 m³; • Auxiliar 2 60 Hz: 19 m³; • Regulação 50 Hz: 13 m³; • Regulação 60 Hz: 13 m³; • Volume total: 3.029 m³
	Sistema óleo lubrificante	<ul style="list-style-type: none"> • Estoque e tratamento do óleo lubrificante das unidades de geração; • Óleo: Marbrax TR-50; • Volumes: • Mancais superior gerador: 5 m³; • Mancais intermediários (thrust e guide bearing): 32 m³; • Mancais turbina: 5 m³; • “governor”: 18 m³; • freios, etc do gerador: 2 m³; • TOTAL por unidade: 62 m³; • 2 centros de estocagem e purificação de óleo, nas áreas de montagem; • Cada um: 2 tanques 90 m³ (óleo limpo e sujo), 2 moto-bombas, dois purificadores óleo,

(continua)

Tabela D.60- (continuação)

Componentes	Dados	
Sistemas auxiliares	Sistema de água tratada	<ul style="list-style-type: none"> • Obtida dos tanques na barragem principal em 3 sistemas separados da casa de força; • 3 sistemas: • Água potável: uso em WCs, bebedouros e ar condicionado; • Água desclorificada: uso para resfriamento estator; • Água clarificada: sistema de ventilação;
	ETE	<ul style="list-style-type: none"> • Projetada para 1.350 pessoas; • Provenientes dos WCs; • Movimentação por gravidade até casa de força, em três tanques de concreto reforçado, com dois compartimentos de 0,45 m³ cada, cada um com motor e agitador, ventilação e saída para bomba que vai para fossa séptica, receber cloro antes da descarga;
	Sistema de combate a incêndio	<ul style="list-style-type: none"> • Por água: proveniente da caixa espiral da turbina, com saídas em diversos pontos; • Extintores móveis de CO₂; • Por CO₂, em 2 bancos de cilindros (1 principal e outro de back-up) para cada dois geradores. Dimensionados para 104 cilindros + 60 ;
	Sistema de Ventilação	<ul style="list-style-type: none"> • Ar resfriado: Cada unidade geradora • 4 ventiladores axiais (25.75 m³/h, 635 N/m²), um evaporador (bomba de 66,5 m³/h, 25+ 2 bombas 33,2 m³/h, 25m); • Ar sem resfriamento: • 4 ventiladores axiais (20,44 m³/h, 635 N/m²) e 2 ventiladores (5,15 m³/h, 380 N/m²; • outros sistemas semelhantes em: unidades geradoras, sala diesel, áreas de montagem; • Exaustão • Separado das saídas de ar; • Em: sala baterias, WCs, sala diesel;
	Sistema de ar condicionado	<ul style="list-style-type: none"> • 2 plantas, cada uma com: • 2 refrigeradores 698 kW, freon R12; • 1 refrigerador de emergência 208 kW; • 3 bombas de água fria, 0,03 m³/s, 75m; • 2 bombas água fria, 0,0083 m³/s, 40 m; • painel controle.

(continua)

Tabela D.60- (continuação)

Componentes	Dados						
Sistemas Auxiliares	Sistema de energia auxiliar	<ul style="list-style-type: none"> • Diesel • 2 conjuntos. Em cada um: • 2 geradores de 5,25 MVA • 2 transformadores; • 1 switcgear • estoque de diesel • pórtico • Corrente contínua • 12 conjuntos de 2 baterias alcalinas de 125V, e 2 carregadores estáticos 					
	Pórticos	#	Descrição	Capacidade	Peso (t)	Fabricante	
		4	Pontes rolantes principais	10 MN	565	Pohlig- Heckel (2) e Bardella (2)	=4.565 = 2.260 t
		2	Pontes rolante auxiliares	2,5 MN	250	Mecânica Pesada	= 2.250= 500 t
		2	Pontes rolantes auxiliares	1,0 MN	155	Sermec	=2. 155= 310 t
		2	Ponte área montagem dir.	2,5 MN	250	Ishibras	= 2.250= 500 t
		2	Ponte área montagem central	2,5 MN	250	Mecânica Pesada	= 2.250= 500 t
		2	Ponte rolantes dos transf. Principais	2,5 MN	250	Villares	= 2.250= 500 t
		2	Ponte da galeria SF ₆	0,1 MN	*	Pohlig-Heckel	*
	Total						4.570 t
Outros Serviços	<ul style="list-style-type: none"> • Iluminação • Lâmpadas incandescentes em áreas fechadas (galerias, etc); • Lâmpadas fluorescentes em áreas de alta necessidade iluminação; • Lâmpadas vapor mercúrio; • Aterramento; • Cabeamento; 						
Sala controle	<ul style="list-style-type: none"> • quadro de comando, controle e proteção das unidades geradoras; • quadro de comando, controle e proteção das linhas de saída em 500 kV; • quadro distribuição energia; 						

Consolidando os valores quantificados nas Tabelas D.58, D.59 e D.60, temos os valores apresentados na Tabela D.61.

Tabela D.61– Consolidação da estimativa do peso dos principais equipamentos eletromecânicos da usina (modificado de ITAIPU BINACIONAL, 1994).

Estrutura	Equipamento	Peso (t)
Vertedouro	Comportas	4.531,8
	Mecanismo hidráulico	397,6
	Pórtico móvel (gantry crane)	89,7
	Stop-logs	765,6
	Viga elevação	23,8
Barragens- tomada d'água	Comporta	4.356
	Limpa-grade	167,8
	Condutos forçados	16.894
	Pórticos	372,8
	Stop-log	287,8
	Viga elevação	35,8
Casa de Força e Área de montagem	Turbina	55.233,2
	Equipamento auxiliar	3.927,3
	Gerador	69.715,8
	Transformador	8.638
	pontes rolantes principais (10 MN)	2.260
	pontes rolantes auxiliares (2,5 MN)	500
	pontes rolantes auxiliares (1 MN)	310
	pontes de 2,5 MN na galeria dos transformadores;	500
	Pórticos 2,5 MN- área montagem dir.	500
	Pórticos 2,5 MN- área montagem central	500
TOTAL		170.007,0

Como se pode notar, o valor aqui avaliado fica muito abaixo das estimativas anteriores (diferença de 17,7% para o valor de 1975 e de 28,9% para do relatório anual de 1981) Na verdade, este resultado já era esperado uma vez que diversas estruturas e equipamentos não foram considerados na quantificação (como bombas, elevadores, pequenos pórticos, estruturas de suporte, etc).

Se subtrairmos os dados de geradores, turbinas, transformadores principais, condutos forçados, temos os valores apresentados na Tabela D.62.

Tabela D.62- Dados de equipamentos sem os principais (modificado de ITAIPU BINACIONAL, 1994).

Estrutura	Equipamento	Peso (t)
Vertedouro	Comportas	4.531,8
	Mecanismo hidráulico	397,6
	Pórtico móvel (gantry crane)	89,7
	Stop-logs	765,6
	Viga elevação	23,8
Barragens- tomada d'água	Comporta	4.356
	Limpa-grade	167,8
	Pórticos	372,8
	Stop-log	287,8
	Viga elevação	35,8
Casa de Força e Área de montagem	pontes rolantes principais (10 MN)	2.260
	pontes rolantes auxiliares (2,5 MN)	500
	pontes rolantes auxiliares (1 MN)	310
	pontes de 2,5 MN na galeria dos transformadores;	500
	Pórticos 2,5 MN- área montagem dir.	500
	Pórticos 2,5 MN- área montagem central	500
TOTAL		15.599

D.5.5 Estimativa das quantidades de materiais em cada equipamento para uso neste trabalho.

De modo a tornar a estimativa o mais precisa possível, dentro das limitações de dados coletados, decidiu-se separar os dados das turbinas, geradores, transformadores e condutos forçados dos demais equipamentos. Para tanto, verificou-se que dentre as referências levantadas aquela que apresenta os valores mais atuais e completos para os pesos dos equipamentos eletromecânicos é o livro publicado após a conclusão da obra, e que descreve minuciosamente cada parte da usina (ITAIPU BINACIONAL, 1994).

No entanto, como já apresentado, esta referência não apresenta uma consolidação dos demais equipamentos. Desta forma de modo a obter uma estimativa completa dos demais equipamentos permanentes, decidiu-se utilizar os dados do relatório anal de 1981 (ITAIPU BINACIONAL, 1982).

Assim, realizou-se a divisão das estimativas dos equipamentos permanentes em processos denominados como “turbina”, “gerador”, “transformador” e “conduto forçado”, estimados com valores do livro (ITAIPU BINACIONAL, 1994), e um processo que contém o conjunto denominado como “outros”, para estimar o peso dos equipamentos auxiliares, estimados pela diferença entre o total dado no Relatório

Anual de 1981 (ITAIPU BINACIONAL, 1982) e a soma do peso dos equipamentos, utilizando para isso os valores calculados anteriormente.

A seguir estes valores são apresentados para cada um dos equipamentos em questão, inclusive para os “outros”. Cabe dizer que na etapa de operação da usina será incluída a manutenção e substituição de todos estes equipamentos, e portanto são igualmente dados os valores da vida útil de cada um, e sua taxa de manutenção. Estes valores são estimados a partir de dados de SCHEREIBER (1978), que fornece valores condizentes com a época da construção da usina. Uma vez que o autor apresenta faixas de valores, será considerado que a vida útil será a maior possível, uma vez que pelo porte e importância da obra os equipamentos devem ter sido fabricados com a melhor tecnologia disponível à época, mas a taxa de manutenção também será a mais alta, em virtude da intensa utilização com o qual a usina de Itaipu trabalha (ITAIPU BINACIONAL, 2003).

a. turbinas

A estimativa da Tabela D.60 para o peso das turbinas é de 55.233,2 t em turbinas e mais 3.927,3 t em equipamentos auxiliares. Considerando, como já exposto, este peso como sendo todo em aço, temos uma total de 59.160,5 t de aço, que dividido pelas 18 unidades resulta em 3.286,7 t de aço para cada turbina, já incluídos seus equipamentos auxiliares.

Quanto às taxas de manutenção e substituição, SCHREIBER (1978) apresenta para as turbinas os valores de vida útil entre 20 e 40 anos e taxa de manutenção de 0,5 a 1,5%. Como já justificado, tanto a vida útil como a taxa de manutenção serão consideradas como as máximas, ou seja, 40 anos de vida útil e 1,5% de taxa de manutenção.

b. geradores

Segundo a ITAIPU BINACIONAL (1994), com dados consolidados na Tabela D.60, tem-se na usina 69.715,8 t de geradores. Este valor, considerando que o dado equivale a 18 geradores, resulta em 3.873,1 t por gerador. No entanto, parte destes é constituída de cobre. Segundo dados da Voith- Siemens (CUNHA, 2002), um gerador de 50 Hz de Itaipu tem 190 t de cobre. Por falta de dados adicionais, assumiremos a

mesma quantia para o gerador de 60 Hz. Desta forma, para cada gerador tem-se 3.683,1 t de aço e 190 t de cobre.

Quanto à vida útil do gerador, SCHREIBER (1978) apresenta os valores de 15 a 25 anos, com taxa de manutenção de 1 a 3 %. Usando as mesmas hipóteses que para as turbinas, tem-se uma vida útil de 25 anos, com taxa de manutenção de 3,0%.

c. óleo lubrificante

Certamente a usina de Itaipu possui diversos pontos de consumo de lubrificante, mas o principal destes sem dúvida são os mancais das unidades de geração. De acordo com o JORNAL DE ITAIPU (2001), a usina possui cerca de 1,35 milhões de litros de lubrificante em suas instalações, com uma vida útil estimada em 20 anos. Admitindo que esta quantidade equivale a 18 unidades geradoras, tem-se um consumo de lubrificante de 75 m³ de óleo por unidade geradora. Este óleo, obviamente, não se localiza totalmente nos mancais das turbinas e geradores, ficando a maior parte armazenada em um reservatório de onde é bombeada para uso.

Ainda de acordo com o JORNAL DE ITAIPU (2001), uma vez que se está chegando próximo à primeira troca (em 2003 as primeiras unidades postas em operação completam 20 anos), a empresa tem buscado desde 1992 uma saída para a destinação deste óleo usado, implementando o chamado projeto PROLUB- Projeto de Lubrificação Planejada, que basicamente consiste na recuperação deste lubrificante adicionando um coquetel de aditivos especialmente desenvolvido pela PETROBRAS. Este processo, segundo entrevistas citadas na referência permitirá o pleno reuso deste óleo, evitando novas aquisições e o descarte do mesmo.

Embora seja uma simplificação bastante grande, admitir-se-á neste estudo que não haverá troca do óleo lubrificante. Desta forma, o consumo de lubrificante se dará apenas na construção da usina, não havendo nenhum consumo ao longo da operação, em virtude do projeto citado. Embora parte do óleo certamente seja perdida, nem que por ineficiências durante o processo de purificação, não existem dados para estimativa, tendo-se decidido trabalhar com a regeneração de 100% do óleo.

Cabe dizer que o óleo lubrificante é diretamente obtido do processo de refino do petróleo, sendo neste caso considerado um derivado proveniente da refinaria sem processos de transformação intermediários.

d. transformadores

Sem considerar o óleo em seu interior (que será contabilizado a parte), os 18 transformadores principais da usina somam 8.638 t, segundo os dados consolidados na Tabela D.60, a partir das informações de ITAIPU BINACIONAL (1994). Destes, boa parte é de cobre, mas não foi possível obter dados precisos desta quantidade especificamente para Itaipu.

Para que se possa realizar esta estimativa no entanto, decidiu-se utilizar o valor dado para um transformador equivalente da ABB (ABB, 2003), onde dos 227.868 kg do transformador seco, 39.960 kg são de cobre (17,5% do peso seco do transformador). Aplicando este fator ao caso de Itaipu, temos para o conjunto dos 18 transformadores a quantidade de 1.511,6 t de cobre, e 7.126,3 t de aço, o que resulta em 395,9 t de aço e 84,0 t de cobre para cada transformador.

SCHREIBER (1978) tampouco apresenta valores de vida útil para transformadores deste porte. Desta forma, utilizou-se novamente os dados da empresa ABB (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2003), segundo os quais a vida útil é de 35 anos. Para a taxa de manutenção manteve-se os valores de SCHREIBER (1978), por falta de outro mais confiável. Desta forma, considerando vida útil de 35 anos e taxa de manutenção de 1,5%.

Quanto ao óleo de transformador, a empresa apresenta (ITAIPU BINACIONAL, 1994) para toda a instalação o valor de 3.029 m³ de óleo de transformador, o que significa 168,3 m³ de óleo para cada transformador. Cabe citar que, assim como o lubrificante, este óleo não permanece dentro do transformador, o que seria inviável. Na verdade a maior parte deste óleo se encontra nos reservatórios e no sistema de purificação, localizado nas áreas de montagem. Apenas como observação, cabe citar que segundo o JORNAL DE ITAIPU (2001), cada transformador contém cerca de 45 m³ de óleo em seu interior.

Como em cada área de montagem há uma central de purificação, e tendo em vista que não se admitirá nesta estimativa a troca do óleo de lubrificação, será admitido que o óleo de transformador tampouco será substituído. Esta claramente é uma hipótese simplista, mas na ausência de dados confiáveis para estimativa será assumida como primeira estimativa.

Cabe ressaltar que para modelar o consumo deste óleo, a exemplo do que foi feito com os equipamentos, não será considerado seu processo de fabricação, mas apenas os seus insumos de produção. Segundo o catálogo de um fabricante deste tipo de óleo (NYNAS, 1998), os óleos de transformador são obtidos a partir da fração de óleo lubrificante do craqueamento do petróleo, por meio de um processo físico-químico que envolve a extração por solvente de alguns elementos e sua purificação e hidrogenação. Desta forma, consideraremos neste trabalho que seu insumo produtivo é o mesmo do óleo lubrificante.

e. condutos forçados

De acordo com a Tabela D.60, o peso de cada um dos 18 condutos forçados é de 883 t, sendo que para o conjunto dos 18 existe um total de 1.000 t em suportes. Desta forma, tem-se um total de 938,6 t de aço para cada conduto.

SCHEREIBER (1978) não apresenta valores específicos para estes equipamentos, mas sim para a tomada d'água, de 20 a 30 anos de vida útil e taxa de manutenção de 1 a 3%, que serão admitidos nesta aproximação. Admitindo os valores máximos para os condutos, temos 30 anos de vida útil e taxa de manutenção de 3,0%.

f. outros

Conforme os cálculos a partir dos dados da ITAIPU BINACIONAL (1982), tem-se na usina, fora turbinas, geradores, transformadores e condutos forçados, um total de 115.170 t em aço.

SCHEREIBER (1978) apresenta valores para comportas, que será admitido aqui para toda esta classe de equipamentos. Estes são de 40 -60 anos de vida útil, e a taxa de manutenção de 0,75 a 2 %. Considerou-se neste estudo a vida útil de 60 anos e taxa de manutenção de 2%.

O resultado das estimativas é apresentado na Tabela D.63, a seguir.

Tabela D.63- Estimativa dos dados individuais dos equipamentos eletromecânicos principais da usina.

	Aço (t)	Cobre (t)	Óleo (m ³)	Vida útil (anos)	Tx Manutenção (%)
Turbina	3.286,7	-	75	40	1,5
Gerador	3.683,1	190		25	3,0
Transformador	395,9	84	168,3	35	1,5
Conduto Forçado	938,6	-	-	30	3,0
Outros	115.170	-	-	60	2,0

Deve-se ter em mente que a usina de Itaipu, como citado no Anexo C, foi construída para operar com unidade geradoras, embora apenas 18 tenham sido instaladas num primeiro momento. No entanto, já estão em estado bastante adiantadas as obras de expansão, para que a partir de 2004 a usina conte com 20 unidades geradoras. Desta forma, muitos equipamentos eletro-mecânicos principais serão adicionados nesta segunda fase.

D.5.6 Modelagem dos equipamentos permanentes

Durante o desenvolvimento do modelo deste inventário no SimaPro, decidiu-se propiciar aos futuros usuários uma estrutura de processos flexível, que permita modificações de diversas naturezas. Em função da sensibilidade dos resultados do inventário a este parâmetro, o horizonte de análise foi tido como especialmente relevante, e portanto teve-se atenção específica para dotar o modelo de flexibilidade quanto a este item.

Este cuidado refletiu na prática na criação, dentro do programa SimaPro, de uma série de “processos” destinados a permitir alterar de modo simples a quantidade de anos pelos quais se considera a operação da usina (horizonte de análise do estudo). Especificamente no caso do presente modelo da usina de Itaipu, são afetados por este procedimento as estimativas referentes à etapa de “operação” da usina, a saber: manutenção e operação de equipamentos permanentes, emissão de gases de efeito estufa, energia própria consumida e energia gerada.

Para a emissão de gases de efeito estufa e consumo de energia, fez-se simplesmente o cálculo anual, sendo apenas necessário ao usuário do inventário especificar o número de anos de operação (horizonte de análise) no cálculo da etapa de operação, como será visto nos itens a seguir deste Anexo. Para os equipamentos permanentes no entanto, foi necessário criar uma estrutura mais complexa.

O que se fez para contabilizar os consumos de insumos na instalação, manutenção e substituição dos equipamentos permanentes, foi criar “processos” dentro do SimaPro que determinem os consumos individuais de insumos em cada “turbina”, “gerador”, “transformador”, “conduto forçado” e “outros”. Estes processos possuem os valores calculados anteriormente de aço, cobre, óleo lubrificante e óleo de transformador.

Em seguida, foram criados outros “processos”, que ao final fornecem a quantidade de cada equipamento (“turbina”, “gerador”, “transformador”, “conduto forçado” e “outros”), para um dado período determinado, incluindo as unidades instaladas logo de início, aquelas instaladas na expansão (atualmente em andamento), e as necessárias manutenções e substituições para que se atinja o horizonte de análise determinado. Estes processos foram divididos entre as etapas de construção e operação, sendo que a quantidade total de equipamentos para o ciclo de vida é dado pela soma das duas etapas.

A seguir, descreve-se o cálculo realizado para cada um dos “processos” do SimaPro criado para realizar esta estimativa.

a. construção da usina

Para a etapa de construção da usina criou-se dois processos:

- “equipamentos instalados em 1984”: representa os equipamentos instalados no ano de 1984, ou seja 18 turbinas, 18 geradores, 18 transformadores, 18 condutos forçados e um conjunto de “outros”;
- “equipamentos instalados em 2004”: representa os equipamentos instalados na expansão da usina, em 2004, ou seja, 2 turbinas, 2 geradores, 2 transformadores e 2 condutos forçados;

b. operação da usina

Para a etapa de operação da usina no entanto, existem mais detalhes a considerar. Durante a operação, é necessário que se considere a manutenção dos equipamentos instalados na construção, tanto em 1984 como em 2004 (com diferentes períodos de final de vida útil), a substituição dos equipamentos da construção após o final da sua vida útil e a manutenção destes equipamentos substituídos.

Esta contabilização possui duas dificuldades: as diferentes datas de final das vidas úteis, e a necessidade de flexibilizar o horizonte de análise.

A solução encontrada foi dividir o período de operação em duas fases. A primeira fase vai deste o início da operação, em 1984, até o final da vida útil do último equipamento instalado na construção. A segunda fase vai desta data em diante.

Tendo em vista os dados apresentados na Tabela D.63, pode-se verificar que o último equipamento a ter finda sua vida útil serão as turbinas instaladas em 2004, ou seja, a primeira fase terminaria no ano de 2044, ou seja, 60 anos após o início da operação da usina.

Coincidentemente, este período de 60 anos é o menor valor de horizonte de análise encontrado na literatura, e considerou-se que não será admitido em nenhuma hipótese um horizonte de análise menor que este, mesmo por que não se tem notícia de nenhuma usina hidrelétrica que seja planejada para operar por menos de 60 anos.

Assim, decidiu-se fazer com que até 2044 as estimativas não sejam flexibilizadas. Ou seja, o consumo de equipamentos permanentes na operação da usina foi dividido em duas partes:

- “substituição e manutenção até 2044”: constante;
- “substituição e manutenção após 2044 (ANUAL)”: calcula os consumos anuais, e desta maneira o usuário do inventário teria que informar ao modelo por quantos anos a usina operaria além dos 60 anos iniciais.

A seguir, são detalhados os processos que formam estas duas fases:

- a) “substituição e manutenção após 2044 (ANUAL)”: esta segunda fase do consumo de equipamentos na operação foi conduzida utilizando o artifício de aplicar um fator ao consumo individual de cada unidade de cada equipamento. Este fator “F”, representa o consumo na manutenção e na substituição dos equipamentos para cada ano adicional de operação, e foi obtido com o seguinte cálculo:

$$F = (1 + \text{taxa de manutenção}) / \text{vida útil}$$

, sendo a taxa de manutenção apresentada na forma de fração.

Aplicando este fator aos consumos de uma unidade do equipamento, o que na realidade se faz é primeiramente calcular o consumo de uma unidade com manutenção durante sua vida útil, para depois, dividindo pela vida útil, obter o valor dos consumos para o equipamento com manutenção durante um ano de operação.

Esta fator foi calculado para cada equipamento, nos processos denominados como “Substituição e manutenção ANUAL de um (*nome do equipamento*)”. Nestes, aplica-se aos consumos de cada equipamento os seguintes fatores:

- turbinas: $(1+0,015)/40= 0,0254$;

- geradores: $(1 + 0,030)/25 = 0,0412$;
- transformadores: $(1 + 0,015)/35 = 0,0290$;
- condutos forçados: $(1 + 0,030)/30 = 0,0343$;
- outros: $(1 + 0,020)/60 = 0,0170$;

Conforme já comentado, no uso do inventário, basta o usuário aplicar a este processo o número de anos de operação adicionais aos primeiros 60 anos.

b) “substituição e manutenção até 2044”: é a soma dos seguintes processos:

- “manutenção dos equipamentos instalados em 1984”: calcula a quantidade de unidades necessárias para a manutenção dos equipamentos instalados em 1984, até o final da vida útil de cada um. Para isso, utiliza-se novamente um fator, obtido pelo produto da taxa de manutenção do equipamento, em fração, pelo número de unidades do equipamento instaladas em 1984. Assim, tem-se os seguintes fatores:
 - turbinas: $0,015 \cdot 18 = 0,27$;
 - geradores: $0,030 \cdot 18 = 0,54$;
 - transformadores: $0,015 \cdot 18 = 0,27$;
 - condutos forçados: $0,030 \cdot 18 = 0,54$;
 - outros: $0,020 \cdot 1 = 0,020$.
- “manutenção dos equipamentos instalados em 2004”, que faz o mesmo cálculo para a quantidade de equipamentos instalados em 2004. Tem-se assim os seguintes fatores:
 - turbinas: $0,015 \cdot 2 = 0,030$;
 - geradores: $0,030 \cdot 2 = 0,060$;
 - transformadores: $0,015 \cdot 2 = 0,030$;
 - condutos forçados: $0,030 \cdot 2 = 0,060$;
- “substituição e manutenção dos equipamentos de 1984, até 2044”: estima os consumos na substituição, e conseqüente manutenção dos equipamentos substituídos, após o final da vida útil dos equipamentos instalados em 1984 até a data de 2044. Para tanto, usa um fator dados pelo produto dos anos que restam entre o final da vida útil do equipamento original e o ano de 2044, e a quantidade destes equipamentos instalada em 1984. Os fatores obtidos são:

- turbinas: 20 anos restantes. 18 unidades = 360;
 - geradores: 35 anos restantes. 18 unidades = 630;
 - transformadores: 25 anos restantes . 18 unidades = 450;
 - condutos forçados: 30 anos restantes. 18 unidades = 540;
 - outros: zero anos restantes;
- “substituição e manutenção dos equipamentos de 2004, até 2044”, que faz o mesmo para os equipamentos instalados em 2004. Os fatores neste caso são:
 - turbinas: zero anos restantes;
 - geradores: 15 anos restantes. 2 unidades = 30;
 - transformadores: 5 anos restantes . 2 unidades = 10;
 - condutos forçados: 10 anos restantes. 2 unidades = 20;

A Tabela D.64 a seguir apresenta os dados de cada um destes processos, fazendo o cálculo da quantidade de cada equipamento permanente para o horizonte de análise de 100 anos. Logo em seguida, a Tabela D.65 aplica estes valores para os consumos de aço e cobre de cada equipamento, estimando os consumos totais para os 100 anos de operação de Itaipu.

Tabela D.64- Consolidação das quantidades de equipamentos permanentes utilizadas em 100 anos de operação da usina.

Equipamento	Construção			Operação										TOTAL	
	Equipamentos instalados em 1984	Equipamentos instalados em 2004	Total Construção	Após 2044			Até 2044								Total Operação
				Fator "F" (Substituição e manutenção anual de ...)	Substituição e manutenção após 2044 (ANUAL)	Substituição e manutenção após 2044 (100 anos)	Manutenção dos equipamentos instalados em 1984	Manutenção dos equipamentos instalados em 2004	Substituição e manutenção dos equipamentos de 1984, até 2044		Substituição e manutenção dos equipamentos de 2004, até 2044				
Turbina	18	2	20	$(1+0,015)/40 = 0,0254$	20. F= 0,508	20.F.40 = 20,32	0,015.18 = 0,27	0,015.2 = 0,030	(20.18).F = 360.F	9,144	0.F= 0	0	29,8	49,8	
Gerador	18	2	20	$(1+0,030)/25 = 0,0412$	20.F= 0,8248	20.F.40 = 32,96	0,030.18 = 0,54	0,030.2 = 0,060	(35.18).F = 630.F	25,956	(15.2).F = 30.F	1,236	60,8	80,8	
Transformador	18	2	20	$(1+0,015)/35 = 0,0290$	20.F= 0,580	20.F.40 = 23,30	0,015.18 = 0,27	0,015.2 = 0,030	(25.18).F = 450.F	13,050	(5.2).F = 10.F	0,290	36,8	56,8	
Conduto Forçado	18	2	20	$(1+0,030)/30 = 0,0343$	20.F= 0,686	20.F.40 = 27,44	0,030.18 = 0,54	0,030.2 = 0,060	(30.18).F = 540.F	18,522	(10.2).F = 20.F	0,686	47,3	67,3	
Outros	1	-	1	$(1+0,020)/60 = 0,0170$	1.F= 0,0170	1.F.40= 0,680	0,020.1 = 0,020	0	0	0	0.F= 0	0	0,7	1,7	

Tabela D.65- Consumos de aço e cobre pelos equipamentos permanentes em 100 anos de operação de Itaipu.

	Quantidade		Consumo individual		Consumo Construção		Consumo Operação		Consumo Total	
	Construção	Operação	Aço (t)	Cobre (t)	Aço (t)	Cobre (t)	Aço (t)	Cobre (t)	Aço (t)	Cobre (t)
Turbina	20,0	29,8	3.286,7	0,0	65.734,0	0,0	97.943,7	0,0	163.677,7	0,0
Gerador	20,0	60,8	3.683,1	190,0	73.662,0	3.800,0	223.932,5	11.552,0	297.594,5	15.352,0
Transformador	20,0	56,8	395,9	84,0	7.918,0	1.680,0	22.487,1	4.771,2	30.405,1	6.451,2
Conduto Forçado	20,0	47,3	938,6	0,0	18.772,0	0,0	44.395,8	0,0	63.167,8	0,0
Outros	1,0	0,7	115.170,0	0,0	115.170,0	0,0	80.619,0	0,0	195.789,0	0,0
TOTAL					281.256,0	5.480,0	469.378,0	16.323,2	750.634,0	21.803,2

D.5.7 Transporte dos equipamentos permanentes

Devido às grandes dimensões e pesos de diversos dos equipamentos permanentes da usina de Itaipu, diversas operações de transporte especiais tiveram de ser realizadas. A Tabela D.66 abaixo ilustra este fato, apresentando dados de algumas das principais peças inteiriças que foram transportadas para a usina.

Tabela D.66– Exemplos de peças de grandes dimensões e peso transportadas para Itaipu (CAVALCANTI, 1979)

Peça	Maior dimensão (m)	Peso (t)
Rotor da turbina	8,50	300
Eixo da turbina, bipartido	5,53	130
Cubo do rotor do gerador	5,20	125
Parte central cruzeta do gerador	8,00	150
Eixo do gerador	7,00	115

Segundo os Relatórios Anuais da empresa (ITAIPU BINACIONAL, 1982; 1983; 1984) estes transportes totalizaram 2.700t em 1981, 13.413 t em 1982 e 49.500 t entre 1983 e 1984.

Desta forma, percebe-se que houve grande movimentação de veículos de grande porte entre as fábricas dos equipamentos e a obra, resultando possivelmente em consumos de diesel e emissões atmosféricas significativas. No entanto para os fins deste trabalho estas quantidades não serão estimadas, devido à grande incerteza que trariam nas atuais condições de disponibilidade de dados. Estas incertezas se devem basicamente a três motivos: desconhecimento das rotas, das cargas e das características dos veículos, o que impossibilita qualquer estimativa razoável.

Cabe dizer que dentre as rotas, muitas são internacionais, para as quais não se tem precisadas a origem ou o meio de transporte utilizado. A única informação que foi possível levantar, e que apresenta-se aqui para fins de registro, são algumas indicações dos principais fabricantes de equipamentos envolvidos, conforme apresenta a Tabela D.67, a seguir.

Tabela D.67– Principais fabricantes de equipamentos eletromecânicos (ITAIPU BINACIONAL, 1982, 1983).

Equipamento	Fabricante
Turbinas e geradores	Mecânica Pesada S.A., Bardella S.A., Ind. Elétrica Brown Boveri S.A., Siemens S.A. e Voith S.A. (Brasil), Consórcio de Ingenieria Electromecanica (Paraguai), Brown Boveri Cie (Suiça), Brown Boveri AG (Alemanha), Siemens Aktiengesell Schaft (Alemanha), JM Voith GmBh (Alemanha), Ceusot Loire (França) e Societá Alsthan Atlantique (França).
Comportas, grades, condutos, guindastes, pontes, pórticos, etc.	Mecânica Pesada S.A., Bardella S.A., BSI Ind. Mecânica S.A., Voith do Brasil S.A., Badoni, COEMSA, Ishibrás, Pohlig-Heckel do Brasil, Equipamentos Villares (Brasil); Consórcio de Ingenieria Electromecánica (Paraguai)

Outra consideração interessante é sobre a logística do transporte. Segundo a REVISTA CONSTRUÇÃO PESADA (1983), no transporte do rotor do gerador mais de 50 pessoas acompanharam a comitiva em diversos veículos. O rotor em si foi transportado numa carreta de 296 rodas, montadas em 13 eixos, que andava numa velocidade máxima de 5 km/h, o que fez com que o transporte levasse 45 dias para ir de Taubaté/ SP até Foz do Iguaçu (cerca de 1.300 km). Tendo 203t de peso próprio, esta carreta não se enquadra em nenhuma classe de equipamentos para os quais se dispõe de fatores de consumo ou emissão, tornando qualquer estimativa extremamente incerta.

Desta forma, conforme já dito, decidiu-se não incluir neste estudo o consumo e as emissões do transporte dos equipamentos permanentes da usina, ainda que se considere que estes podem apresentar relevância ambiental.

D.6 Emissão de gases de efeito estufa pelo reservatório

A formação do reservatório das usinas hidrelétricas promove a submersão de biomassa anteriormente em contato direto com a atmosfera, alterando de modo significativo o processo de degradação natural desta matéria orgânica. Embora este fato seja amplamente aceito pela comunidade científica, até o momento não há consenso sobre o mecanismo da degradação nestas novas condições.

Uma das principais dificuldades encontradas no desenvolvimento de modelos deste processo se deve ao fato de que cada reservatório é um caso único, em função das variáveis possíveis de afetarem o processo de degradação da biomassa. Alguns exemplos destas variáveis, segundo a bibliografia consultada (BIACHINI JR., 1997; BRASIL, 2002; FEARNSIDE, 1995, 1997, 2000; GOMES, 1997; LIMA, NOVO,

1999; MATVIENKO et al., 1999; ROSA et al., 1997; ROSA, SANTOS, 1999; ROSA, SCHAEFFER, 1995; SANTOS, 2000; TUNDISI, 1997, WEISSENBERG et al., 1999), são:

- tipo e densidade da biomassa anterior ao alagamento;
- condições climáticas locais;
- aporte de carga orgânica de fontes externas ao reservatório pelo rio e margens;
- tempo de residência e turbulência da água, e
- profundidade do reservatório.

A polêmica torna-se ainda mais complexa pelas dificuldades de realizar medidas consistentes e representativas no espaço e tempo, sendo necessário admitir um grande número de hipóteses simplificadoras nos estudos deste tipo.

Considerando que grande número de instituições e pesquisadores, tanto no Brasil como no exterior, vêm se dedicando ao estudo deste tema, e que mesmo tendo realizado importantes avanços nesta área do conhecimento ainda não foi possível obter resultados conclusivos, não será neste Anexo que este nível de certeza será atingido.

No entanto, devido à importância que grande parte dos estudos de ciclo de vida de hidrelétricas dá às emissões de gases da degradação da biomassa alagada, e suas contribuições ao incremento do efeito estufa, este aspecto ambiental não pode ser negligenciado no presente trabalho.

Desta forma, realizou-se uma extensa pesquisa na literatura disponível sobre a emissão dos chamados “gases de efeito estufa”, no caso o CO₂ e o CH₄, emitidos pela degradação da biomassa em reservatórios tropicais. De modo a fornecer subsídios à discussão aqui realizada, o resultado desta pesquisa é sumarizado a seguir.

Posteriormente, desenvolve-se uma estimativa para a usina de Itaipu. Sobre este tema especificamente, foram obtidos de literatura dados medidos na própria usina. Deve-se no entanto apresentar desde já a posição da Itaipu Binacional, melhor descrita adiante, de que estes dados não são conclusivos e portanto seu uso não é recomendado. Mesmo assim, e respeitando a posição da empresa, na falta de informações mais precisas estes foram aplicados, deixando a recomendação de que

esta estimativa seja atualizada assim que dados mais conclusivos sejam obtidos, devido à sua incerteza.

D.6.1 Origem das emissões de gases de efeito estufa em reservatórios de hidrelétricas

A transformação induzida dos ecossistemas terrestres em lacustres provoca sérias alterações não apenas no perfil de fauna e flora da região, efeito mais visível, mas também nas características do solo, micro fauna e flora e na qualidade da água. Estas modificações, por uma diversidade de processos, modificam o mecanismo de degradação da biomassa na área alagada, seja da matéria orgânica existente no solo, na vegetação submersa ou presente na água. Estas mudanças alteram significativamente o ciclo do carbono na região, e conseqüentemente a emissão dos gases que contribuem ao incremento do efeito estufa, nominalmente o CO₂ e o CH₄. De modo a iniciar-se a discussão, vale citar o trabalho de BIANCHINI JR. (1997), que estuda o processo de degradação da matéria orgânica em reservatórios. De acordo com o autor, existem basicamente três origens para a matéria orgânica decomposta em um reservatório:

- vegetação alagada pela formação do reservatório;
- detritos particulados e dissolvidos carreados pela chuva, tributários (corpos d'água que deságuam no reservatório) e água de escoamento das enxurradas - chamadas genericamente de fontes alotóctones, e
- detritos originados dos processos de produção primária do reservatório - chamadas fontes autóctones.

Neste estudo, BIANCHINI JR. (1997) apresenta extensa descrição das fontes, formas e propriedades do carbono em ecossistemas aquáticos, abordando também a cinética das reações do processo de decomposição e modelando estas transformações ao final. Na mesma publicação pode-se encontrar outro artigo de interesse, a respeito da degradação da biomassa e da atividade bacteriana em ecossistemas aquáticos, elaborado por GOMES (1997).

Sobre o modo com o qual estes processos de decomposição afetam o meio ambiente, ROSA, SANTOS (1999) afirmam que há duas formas de transporte dos gases de degradação da matéria orgânica nos reservatórios para a atmosfera:

- por “difusão”: ocorre nas camadas próximas à superfície, na presença de oxigênio, por decomposição aeróbia, gerando primordialmente CO₂, e
- por ebulição de “bolhas”: é o resultado da decomposição anaeróbia ocorrida nas camadas mais profundas, com ausência de oxigênio, gerando principalmente metano.

Segundo ROSA, SANTOS (1999) estas duas emissões são relevantes, embora cada localidade possua seu tipo preferencial de processo em função de parâmetros diversos, como clima e profundidade do reservatório. Esta constatação foi realizada após a comparação de estudos brasileiros e canadenses durante um seminário promovido pela Eletrobrás em 1996, onde se verificou que as técnicas de medição usadas pelos cientistas de cada um dos dois países (medição por funis no Brasil e por câmaras no Canadá) eram direcionadas a tipos diferentes de emissões (funis para bolhas e câmaras para difusão), sendo portanto complementares.

No entanto há estudos (ROSA, SANTOS, 1999; TUNDISI, 1997) que admitem que na região amazônica, e talvez em outras áreas tropicais, a principal contribuição às emissões é por bolhas, formadas no fundo do reservatório pela decomposição de folhas e ramos.

De modo mais genérico, de acordo ROSA, SANTOS (1999), as emissões de gases de efeito estufa de reservatório de hidrelétricas dependem fundamentalmente dos seguintes fatores:

- área do reservatório;
- tipo e densidade da biomassa pré-existente;
- tipo de solo e drenagem da bacia hidrográfica;
- profundidade do alagamento da biomassa;
- conteúdo de carbono da biomassa;
- taxa de decomposição, e
- percentual decomposto anaerobicamente.

Uma observação relevante é constatada por WEISSENBARGER et al (1999), que demonstram em seu trabalho que nas emissões de gases de efeito estufa por reservatórios há outras fontes de carbono que não a biomassa alagada., que estariam entre as fontes alotóctones de carbono. De acordo com os autores, importantes contribuições às emissões de CO₂ são provenientes de processos ocorridos no fundo

do reservatório (como a atividade de microorganismos bênticos). Estas constatações explicam em parte um fenômeno constatado em reservatórios boreais, onde não se verifica redução no tempo das emissões de gases de efeito estufa, predominantemente o CO₂, mesmo após 70 anos da inundação. Desta forma, as emissões neste caso não seriam, como antes imaginado, de curta duração e com decaimento exponencial, mas sim razoavelmente constantes e por longos períodos.

Além disso, afirmam os autores, a emissão de gases de efeito estufa representa apenas 10% da perda de carbono pelos reservatórios boreais, sendo grande parte perdida pela água turbinada e vertida pela usina. Um detalhado balanço de massa para o carbono é apresentado neste trabalho, com valores para lagos boreais. Um aspecto relevante é que antes da inundação, dependendo do tipo de solo e sua cobertura, algumas áreas podem ser fontes, e não sorvedouros, de carbono.

No Brasil por sua vez, de acordo com as medições em lagoa amazônicas (ROSA; SANTOS, 1999), a taxa de emissão de CO₂ e CH₄ da decomposição da matéria orgânica alagada decai com o tempo, enquanto há outras fontes de emissão, provenientes de substâncias presentes na água e no solo, que são independentes da idade do reservatório, criando uma nova dificuldade metodológica neste tipo de estimativa.

Uma hipótese bastante aceita até o momento (ROSA; SANTOS, 1999) é que há dois momentos distintos do cenário de emissões de reservatórios. A Tabela D.68 apresenta estes dois momentos.

Tabela D. 68– Prováveis fases das emissões de reservatórios (adaptado de ROSA, SANTOS, 1999)

Fase	Predominância	Origem do carbono	Forma do carbono	Gás emitido
1	Emissões decaindo com idade reservatório	Biomassa alagada	Orgânica	CO ₂ CH ₄
2	Emissões independentes da idade reservatório	Água ou solo da bacia	Orgânica	CO ₂ e CH ₄
			Mineral (calcário)	CO ₂

O decaimento das emissões devido à biomassa alagada é, do mesmo modo, bastante incerto. Segundo RICHEY (1982), *Apud* ROSA et al. (1997), cada tipo de planta possui uma taxa distinta de degradação, sendo que, por exemplo, plantas herbáceas degradam em poucos meses, enquanto troncos e galhos maiores demoram por vezes

muitos anos para se decompor, principalmente se submetidos à degradação anaeróbia.

Como conclusão a seu trabalho, LIMA; NOVO (1999) defendem que em alguns casos a maior contribuição nas emissões provém dos tributários do reservatório, que deságuam em braços deste, onde ocorre menor turbulência em comparação às grandes áreas abertas do lago. Ademais, afirma-se que tanto o aporte de matéria orgânica como a conseqüente emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera dependem das oscilações sazonais de nível do reservatório.

D.6.2 Estudos de emissão de gases de efeito estufa em reservatórios brasileiros

Atualmente para os reservatórios brasileiros há duas linhas de pesquisa predominantes no tema das emissões de reservatórios. A primeira destas é desenvolvida no âmbito do INPA- Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, coordenada pelo pesquisador Philip Fearnside, que fundamenta seu trabalho no desenvolvimento de modelos teóricos, onde a partir de estimativas das diversas fontes de carga orgânica são estimadas as emissões, admitindo taxas de decaimento da biomassa no tempo. A outra linha é desenvolvida principalmente pelo grupo de pesquisas do PPE- Programa de Planejamento Energético da COPPE- Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, da UFRJ- Universidade Federal do Rio de Janeiro, e se baseia em medições de campo para os reservatórios, tendo diversos deles sido realizados em convênios e parcerias com outras entidades, como a Eletrobrás, USP- São Carlos, etc.

Segundo Fearnside, que desenvolve suas pesquisas em reservatórios da região amazônica, a biomassa florestal da região decai de modo lento (FEARNSIDE, 1995). De modo a realizar suas estimativas, divide o reservatório em várias zonas, onde as condições aeróbias e anaeróbias possuem importância relativa diferentes. Basicamente as zonas estabelecidas são (FEARNSIDE, 1995):

- uma zona aérea, da biomassa existente acima do nível d'água, que se decompõe predominantemente de modo aeróbio, mas que eventualmente pode cair na água indo ao fundo, na zona anaeróbia;

- outra parte do reservatório que se encontra parte do tempo alagada e outra não, dependendo do nível d'água. Assim, a condição de oxigenação varia da mesma forma, e
- uma última zona, da biomassa alagada, onde a porção mais próxima à superfície se encontra em condições aeróbias, sendo a profundidade limite determinada pelas condições locais de turbulência, oxigênio dissolvido, etc. O restante, a maior parte em geral, é exposto a condições anaeróbias de degradação, sendo esta denominada zona anóxida.

De acordo com o pesquisador, o processo de degradação na zona anóxida é muito lento, mesmo para folhas que geralmente se consideram de rápida decomposição (FEARNSIDE, 1995). Segundo PAULA (1993), *Apud* FEARNSIDE (1995), considera-se que a madeira abaixo de 1,0m de profundidade não sofre degradação.

Já na zona de degradação aeróbia, segundo RICHEY (1982), *Apud* SANTOS et al (1997), a biomassa com baixo teor de celulose e fibras duras se decompõe rapidamente, perdendo cerca de 50% do peso em duas semanas, e entre 70 e 90% em quatro meses. A situação, segundo o autor, muda significativamente ao se tratar de troncos e galhos, que possuem meia vida em torno de 2,5 a 4,5 anos.

Cabe citar que segundo FEARNSIDE (1995) as emissões da biomassa alagada são ainda suplementadas pela matéria orgânica advinda das fontes alotóctones, como aquela advinda do rio a montante e do solo, e das fontes autóctones, como as macrófitas que se desenvolvem no reservatório.

Sobre a geração de metano oriundo da decomposição no reservatório, ainda é importante que se diga que, segundo FEARNSIDE (1995), esta não é estritamente idêntica à emissão deste gás, uma vez que parte do metano dissolvido na coluna de água se oxida em CO₂ antes de atingir a atmosfera. Segundo o autor, devido à baixa turbulência dos reservatórios das usinas hidrelétricas, só ocorrem grandes emissões de metano quando a água passa pelas turbinas. Além disso, nem todo metano ascende na forma de bolhas, sendo que uma parte segue dissolvida na água a jusante das usinas (FEARNISIDE, 1995).

Para estimar as emissões dos reservatórios, FEARNSIDE (1995) realizou o seguinte procedimento:

1. estimativa da área alagada, por imagem de satélite, excluindo a área do leito original do rio e dos desmatamentos anteriores ao alagamento;
2. estimativa da biomassa anterior ao alagamento, sua distribuição vertical, densidade (por área), e participação de cada tipo de estrutura vegetal (folhas, galhos, ramos, etc);
3. divisão da biomassa em zonas: madeira submersa, madeira -na superfície, folhas e outros na zona anóxida e madeira no solo;
4. subtração da madeira retirada antes do alagamento;
5. cálculo da evolução da degradação da biomassa em cada zona, usando taxas de decaimento estimadas em diversos estudos do próprio autor;
6. adição das emissões da degradação das outras fontes de biomassa, autóctones e alotóctones, e
7. consolidação destas estimativas, e simulação de seu comportamento para 50 anos.

Deste procedimento, FEARNSIDE (1995) concluiu que a emissão de metano é praticamente constante no tempo, mas as emissões de CO₂ estão concentradas num grande pulso de decaimento exponencial na primeira década, após o qual mantém-se constante e num patamar reduzido. No caso estudado à época, a usina de Balbina, a simulação realizada indicou que cerca de 50% das emissões de CO₂ ocorrem nos primeiros 6 anos após o enchimento do reservatório.

Uma vez que o decaimento da parte mais densa da biomassa alagada é demasiadamente lento, mas não existem medições atuais, FEARNSIDE (1995) para suas estimativas usa os valores de 50 anos para a madeira na zona próxima à superfície, 200 anos para folhas na região anóxida, 500 anos para madeira na região anóxida e biomassa no solo sempre submerso e 50 anos para a biomassa no solo sazonalmente alagado.

Além deste processo de decomposição da vegetação alagada, tem-se que o metano é produzido também pela degradação das fontes alóctones e autóctones de biomassa, que não dependem das características da vegetação anterior ao alagamento, sendo as taxas de decaimento destas foram estimadas por FEARNSIDE (1995) com idênticas às taxas da biomassa das várzeas.

Em um estudo posterior, realizado sobre a usina de Tucuruí, FEARNSIDE (1997) estima a densidade de biomassa da floresta, 517 t/ha no total, e usa as mesmas taxas de decaimento que utilizou para Balbina (FEARNSIDE, 1995) para avaliar as emissões. No entanto, neste caso o pesquisador realizou a simulação para um horizonte de 100 anos, obtendo um pulso de CO₂ nos primeiros anos, com as emissões de metano praticamente constantes.

Em um artigo posterior (FEARNSIDE, 2000) sobre o mesmo caso, o autor afirma que para Tucuruí, 87% dos efeitos de aquecimento global provém do CO₂, e apenas 17% do CH₄ emitido, usando um potencial de aquecimento global relativo de 21 para o CH₄ em comparação ao CO₂. Neste estudo incluem-se também as emissões de metano da água que atravessa as turbinas e o vertedor, o que incrementa os valores antes encontrados.

Um aspecto interessante é que estudos mais recentes (DUCHEMIN et al. 2000), *Apud* FEARNSIDE (1997), mostram um pico breve das emissões de metano logo em seguida ao enchimento do reservatório, seguidos de rápido declínio.

Sobre o caso de Tucuruí ainda, BERMANN (2002) realiza uma análise dos dados das emissões estimadas por FEARNSIDE (1997), mostrando que 83,3% das emissões de CO₂ se concentram nos primeiros 10 anos após o enchimento, enquanto para o metano este percentual é de 14,3%. Este cálculo demonstra a concentração das emissões de CO₂ nos primeiros anos, enquanto as emissões de metano são praticamente constantes.

Estes estudos realizados por Fearnside dizem respeito unicamente à região amazônica, como já dito, e segundo SANTOS (2000), podem ser criticados por não utilizar dados da região, confiando em estimativas internacionais para diversos parâmetros, mostrando-se assim pouco representativos.

Já os estudos da COPPE, como colocado anteriormente, partem de dados medidos nos reservatórios. Segundo SANTOS (2000), a partir de estudos realizados pelo CRHEA- Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, da Escola de Engenharia de São Carlos da USP- Universidade de São Paulo sobre o conteúdo de carbono nas águas dos reservatórios das usinas de Samuel e Tucuruí, foi proposto pela COPPE, e aceito pela Eletrobrás, um projeto de medida dos fluxos de gases de efeito estufa para as hidrelétricas de Tucuruí, Samuel e Balbina. Desta forma, em 1993 realizou-se

medidas destes fluxos, encontrando grandes quantidades de emissões de metano em bolhas, principalmente nos reservatórios mais novos.

Este estudo deu origem a outros trabalhos desenvolvidos, como novas medições pelo CRHEA/ USP e o desenvolvimento pela COPPE de um método de generalização do potencial de aquecimento global, com vistas a comparar quanto a este impacto ambiental as usinas hidroelétricas e termelétricas equivalentes.

Em um destes trabalhos, talvez o primeiro a ser publicado, ROSA; SCHAEFFER (1995) estimaram a emissão de Tucuruí para um horizonte de 100 anos, utilizando apenas as emissões de metano admitindo que 30% da biomassa anterior ao reservatório se degrada anaerobiamente.

Posteriormente, em outro estudo (ROSA et al, 1997), o grupo do PPE/ COPPE realizou medições em diversos reservatórios além dos amazônicos, obtendo valores para fluxos de CH₄ e CO₂. Este estudo apresenta as medidas consolidadas e busca avaliar os motivos das variações entre os reservatórios.

Além destes trabalhos realizados em reservatórios amazônicos, o grupo da COPPE conduziu medidas em outros reservatórios brasileiros. Estes estudos fomentaram novos trabalhos, sendo o principal, para os fins deste estudo o desenvolvido por SANTOS (2000), de inventário destas emissões para o parque hidrelétrico do Brasil. Em seu trabalho, que resultou na publicação de uma tese de doutorado (SANTOS, 2000), o autor realiza uma medição experimental das emissões de metano por bolhas (da decomposição da biomassa alagada) e de dióxido de carbono por difusão molecular (material orgânico autóctono e alotóctono). Uma descrição objetiva da técnica de medição utilizada é apresentada em MATVIENKO et al (1999), sendo que outras informações podem ser obtidos no próprio documento da tese (SANTOS, 2000).

A partir da medição das emissões para nove reservatórios selecionados (Miranda, Três Marias, Barra Bonita, Segredo, Xingó, Samuel, Tucuruí, Serra da Mesa e Itaipu) em mg do gás/m². dia, SANTOS (2000) chega a estimativas para 100 anos de operação das usinas. Para tanto, faz uma média das medições das duas campanhas das emissões diárias em cada reservatório e multiplica pela área de cada uma obtida em imagens via satélite e por 365 dias ao ano, obtendo as emissões anuais de cada reservatório.

Com a finalidade de comparar as emissões das hidrelétricas com as emissões de uma termelétrica equivalente, SANTOS (2000) multiplica ainda os valores encontrados por 100, e divide pela estimativa da energia gerada pela usina em 100 anos de operação. Desta forma, o autor obtém os valores das emissões para cada unidade de energia gerada.

O estudo mais recente encontrado no entanto, foi o relatório de referência do projeto “Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros” (BRASIL, 2002), realizado por uma extensa equipe de pesquisadores da COPPE para o Ministério de Ciência e Tecnologia dentro de um contrato com o PNUD- Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, e apoio da Eletrobrás e diversas empresas de energia.

Neste estudo, do mesmo modo que em SANTOS (2000), são tomadas medições em pontos específicos dos reservatórios, é realizada uma extrapolação segundo metodologia própria para todo o reservatório em cada caso, e estima-se um valor para o período de um ano e por área as emissões de CO₂ e CH₄.

Cabe dizer que nos estudos realizados pela COPPE, conforme apresentado nas conclusões de BRASIL (2002), não foi possível uma análise temporal da variação das emissões. Desta forma, para permitir a comparação entre a geração hidrelétrica e a termelétrica, tomou-se a emissão anual de gases, admitida como o produto das emissões diárias por 365 dias/ ano.

D.6.3 Valores estimados para Itaipu

O reservatório de Itaipu possui uma área de 1.350 km², uma profundidade média de 22 metros, podendo chegar a 170m próximo barragem, e tempo médio de residência da água de 30 dias(SANTOS, 2000). A vegetação da região é predominantemente do tipo sub-tropical, e antes do alagamento a composição em termos de área ocupada era de (ITAIPU BINACIONAL, 1981b):

- lado do Brasil (780 km²):
 - 22% florestas (171,6 km²);
 - 24,8% capoeiras (193,4 km²);
 - 50,3% agricultura (392,3 km²);
 - 2% área urbana (15,6 km²);

- 0,9% outros (7,1 km²);
- lado do Paraguai (570 km²):
 - 81,5% florestas (464,5 km²);
 - 13,1% agricultura (74,7 km²)
 - 5% campos naturais (28,5 km²);
 - 0,4% outros (2,3 km²);

Segundo SANTOS (2000), há uma grande dificuldade em determinar o tempo de decaimento da biomassa, uma vez que esta era muito variada e parte da vegetação mais densa foi removida antes da inundação, mas certamente parte importante da produção de ambos os gases considerados (CO₂ e CH₄) é derivada de matéria orgânica “leve”, e portanto as emissões desta decomposição podem se concentrar-se em um período de tempo muito menor que a vida útil do reservatório.

Na verdade, como já apresentado, deve-se ter em mente que no período de análise deste estudo, de 100 anos, as emissões derivadas da decomposição rápida da biomassa aparecem como pulsos, logo em seguida ao enchimento do reservatório.

De modo a estimar as emissões de Itaipu, a primeira medida adotada foi consultar a própria empresa. De acordo com o Eng^o Luiz Dalmi (DALMI, 2002), do Departamento de Meio Ambiente de Itaipu, a empresa realizou duas campanhas de medição de gases de efeito estufa no seu reservatório, uma num braço do lago e outra numa parte central, profunda, ambas sob coordenação da COPPE, e apoio de outros profissionais.

De acordo com DALMI (2002) estas medições não são conclusivas por terem sido realizadas em poucos pontos, sendo necessário que se realizem novas campanhas para obter-se dados mais representativos, uma vez que é bem provável que as emissões variem em função da localização do ponto de amostragem. Desta forma a escolha do braço do lago propicia uma superestimativa, uma vez que nestes pontos em geral há grande acúmulo de matéria orgânica em decomposição, desviando as medidas dos gases oriundos da degradação da biomassa alagada.

Além disso, tendo em vista que as medições foram realizadas cerca de 16 anos após o enchimento do reservatório, grande parte, senão toda, a biomassa mais leve (folhas, pequenos galos, gramíneas, etc) já se decompôs, e os troncos de árvore apresentam decomposição lenta (podendo demorar mais de 200 anos, *sic*), é de se imaginar que

grande parte das emissões atuais do reservatório sejam provenientes do aporte orgânico das atividades desenvolvidas a montante no rio, como por exemplo a suinocultura, o despejo de esgotos urbanos, agricultura, etc.

Desta forma, a empresa decidiu não divulgar os resultados obtidos, se oferecendo para fornecer dados confiáveis assim que disponíveis. Assim esperou-se até o final deste trabalho para realizar uma nova consulta, realizada em Julho de 2003 junto à Superintendência de Meio Ambiente da Itaipu Binacional (ZENHPFENNIG, 2003). No entanto, até o momento da consulta ainda não estavam disponíveis dados confiáveis destas emissões, motivo pelo qual a empresa se isentou de qualquer responsabilidade sobre as estimativas deste aspecto ambiental realizadas neste trabalho.

Respeitando a posição da empresa, bastante compreensível e correta, buscou-se uma forma de realizar as estimativas sem os dados oficiais, uma vez que não era possível abrir mão da quantificação deste aspecto ambiental, ainda que com grande grau de incerteza.

Assim, considerando que a usina de Itaipu é uma das nove amostradas no estudo da COPPE, com valores apresentados em BRASIL (2002) e SANTOS (2000), decidiu-se utilizar estes valores, que segundo o Apêndice C de SANTOS (2000) são:

- emissão de CO₂: 264.212,93 kg CO₂/ dia, e
- emissão de CH₄: 32.188,22 kg CH₄/ dia.

Considerando a metodologia adotada por BRASIL (2002) e SANTOS (2000) para comparação com a geração termelétrica, de emissões constantes pelos 100 anos, pode-se obter os seguintes valores de emissão anuais:

- emissão de CO₂: $9,644.10^7$ kg CO₂/ ano, e
- emissão de CH₄: $1,175.10^7$ kg CH₄/ ano.

Se considerarmos a energia gerada em 1999, ano da medição das emissões no reservatório, que foi de 90.001 GWh segundo a empresa (ITAIPU BINACIONAL, 2003), temos as seguintes emissões específicas:

- emissão de CO₂: 1,072 kg CO₂/ MWh, e
- emissão de CH₄: 0,131 kg CH₄/ MWh.

Apenas para verificação, realizou-se o mesmo cálculo com os valores apresentados em BRASIL (2002), que são:

- emissão de CO₂: 171 kg CO₂/ km²/ dia, e
- emissão de CH₄: 20,8 kg CH₄/ km²/ dia.

Tendo em vista que neste caso é fornecido para Itaipu o valor de área de 1.549 km² para o reservatório, calculam-se as emissões para um ano de todo o reservatório, como sendo:

- emissão de CO₂: 9,668.10⁷ kg CO₂/ ano, e
- emissão de CH₄: 1,176.10⁷ kg CH₄/ ano.

Como se pode notar, estes valores são praticamente idênticos aos valores de SANTOS (2000), que serão efetivamente utilizados.

D.6.4 Comentários sobre as limitações desta estimativa

Tão importante como selecionar um valor para este estudo é observá-lo criticamente, de modo a estabelecer sugestões para que futuras pesquisas possam aprimorar o conhecimento científico na área.

Sobre o dado específico utilizado para estimar as emissões de gases de efeito estufa de Itaipu, à luz dos aspectos teóricos apresentados neste capítulo podemos dizer que as medições realizadas são insuficientes para estabelecer uma quantidade precisa de gases emitidos por todo o reservatório e para todo o período de 100 anos sob análise, uma vez que as emissões variam fortemente em função do tempo e espaço.

No que diz respeito à variação espacial das emissões no reservatório, é de se esperar que esta seja significativa. Esta hipótese é bem provável, principalmente se considerando que o reservatório de Itaipu possui profundidade muito variável e que, conforme apresentado, a área do reservatório era antes ocupada por uma grande diversidade de cobertura vegetal, desde cultivos agrícolas até florestas semi-tropicais. Estes dois fatores já determinam emissões muito variáveis ao longo do reservatório, pois a biomassa estaria heterogeneamente dispersa, e o processo de degradação tampouco ocorreria de modo uniforme mediante condições distintas de luminosidade, aeração e turbulência.

Além disso, o fator temporal é de extrema importância, pois caso consideremos que houve alagamento de quantidade considerável de biomassa, emissões significativas de metano podem ter ocorrido nos primeiros meses após o enchimento do

reservatório, e não serão detectadas por medições neste momento, após quase vinte anos deste evento.

À parte as observações sobre os dados específicos, ou seja, o que se mede ou deixa de medir, cabem algumas considerações sobre a validade do uso direto destas medições. Na verdade deve-se ter em mente o que se pretende com as estimativas deste anexo, ou seja, o objetivo de realizarmos esta estimativa.

Busca-se neste estudo estimar as emissões de gases de efeito estufa para atribuir a contribuição a este aspecto ambiental com a construção do reservatório. Portanto deve-se ressaltar a necessidade de estimar-se não apenas um fluxo de saída destes gases do reservatório, mas sim todo um balanço destas substâncias no sistema em estudo.

Desta forma, para realmente atribuímos a responsabilidade da existência do reservatório neste aspecto ambiental seria necessário estimar quais eram as emissões antes do alagamento, uma vez que devemos trabalhar não com as emissões atuais, e sim com a variação ocorrida nestas emissões. Quanto a isso seria necessário estimar quanto era emitido pelo uso anterior do solo, como os cultivos agrícolas, a vegetação anterior e o próprio rio.

Ademais, como defendido anteriormente, muitas emissões se devem não apenas à biomassa afogada, mas também ao aporte de carga orgânica no reservatório (como esgotos domésticos entre outros), que existiriam com ou sem a presença do reservatório.

Um outro aspecto interessante de ser observado é que por conta do empreendimento, uma extensa área em torno do reservatório foi objeto de projetos de reflorestamento com mata nativa, processo no qual ocorre seqüestro de grande quantidade de carbono da atmosfera pela fotossíntese.

De acordo com dados da empresa (ITAIPU BINACIONAL, 2002), houve até o momento o plantio de cerca de 20 milhões de mudas, de 75 espécies de árvores nativas, numa área de cerca de 100.000 ha, o equivalente a 1.000 km² - uma área equivalente a 74% da área alagada total, e mais de uma vez e meia a área florestal alagada. Desta área, cerca de 40 mil ha constituem reservas ecológicas e refúgios para a fauna silvestre, e 60 mil ha fazem parte da faixa de proteção do reservatório, de mais de 2.900 km de extensão e largura média de 217 m.

Estas considerações apontam que mesmo que se consiga estimar com precisão as emissões do reservatório no período de análise, estaríamos fazendo uma superestimativa caso não fosse subtraída a quantidade de carbono sequestrada no crescimento da biomassa das áreas reflorestadas e as quantidades emitidas antes do enchimento do reservatório na mesma área.

Outra consideração, talvez a mais relevante, é sobre o uso de emissões constantes ao longo do tempo. Deve-se notar que as medidas foram realizadas em Itaipu com o reservatório possuindo mais de 16 anos de idade, o que certamente exclui qualquer pulso de emissões de metano logo após as emissões. Acrescenta-se a este fato que se tomarmos a teoria utilizada por Fearnside, as emissões de metano apresentam-se praticamente constantes no tempo, o que torna o modelo aqui utilizado adequado para a estimativa.

Quanto ao CO₂, de acordo com a teoria utilizada por Fearnside, de fato seria necessário uma estimativa de decaimento das emissões. No entanto esta não é possível por ausência de um método de estimativa das emissões a partir de medições de campo.

Esta talvez seja a maior limitação desta estimativa, mas que também não se apresenta solucionada em nenhum dos estudos encontrados sobre o tema e que partem de dados medidos. Fica portanto a sugestão de que este ponto especificamente seja melhor investigado em estudos posteriores.

Desta forma, embora seja utilizado o valor apontado anteriormente como estimativa das emissões de gases de efeito estufa do reservatório de Itaipu, por ser de momento o melhor dado disponível, cabe ressaltar que este é cercado de incertezas. Assim, como dito inicialmente, para que se tenham valores mais precisos seria necessário a condução não apenas de novas campanhas de medição e o desenvolvimento de métodos de extrapolação de resultados, mas também uma revisão da alocação destas emissões ao reservatório.

D.6.5 Comparação com valores de outros estudos

De modo a verificar a ordem de grandeza dos valores obtidos, apresentam-se a seguir alguns valores de emissão de gases de efeito estufa de reservatórios encontrados em outros estudos.

Uma vez que os dados dos demais estudos são apresentados em emissões equivalentes, é necessário transformar as emissões de metano à esta base. Embora esta transformação seja bastante controversa, tema bem apresentado em artigo sobre o tema de ROSA, SCHAEFFER (1995), utilizaremos aqui o valor apresentado pelo IPCC- International Panel on Climate Change, de 21 kg CO₂ eq./ kg metano (IPCC, 2003). Aplicando este fator aos valores anteriormente obtidos em função da energia temos, segundo as hipóteses deste estudo, uma emissão de 3,85 kg CO₂ eq./ MWh para Itaipu. Deve-se ressaltar que este valor corresponde apenas às emissões do reservatório, e não do ciclo de vida de Itaipu como um todo.

Dentre a bibliografia levantada no tema, o trabalho mais recente que consolida estimativas de emissões de gases de efeito estufa por reservatórios é o publicado por DUCHEMIN (2001), que apresenta alguns valores medidos para reservatórios em regiões boreais e tropicais, e compara valores médios estabelecidos para reservatórios nestes dois tipos de domínio bio-geo-morfoclimático. A Tabela D.69 a seguir apresenta estes valores.

Tabela D.69– Emissões estimadas de gases de efeito estufa de alguns reservatórios (DUCHEMIN, 2001)

Reservatório	Emissão (kg CO ₂ eq./ MWh)
Reservatórios Boreais	
Complexe La Grande	0,05 ±0,02
Churchill /Nelson	0,02 ±0,01
Complexe Manic	0,04 ±0,02
Sainte- Margueritte	0,02 ±0,01
Churchill Falls	0,2 ±0,1
Reservatórios Tropicais	
Tucuruí	0,2 ±0,05
Serra da Mesa	0,2 ±0,05
Petit- Sant	2 ±1,25
Curuá- Uma	3 ±1,6
Balbina	14 ±7

Outro estudo que apresenta valores de emissão de gases de efeito estufa para reservatórios de hidrelétricas é o realizado por GAGNON et al. (2002), que consolida os resultados de diversos estudos internacionais, de acordo com os autores. Neste artigo, apresenta-se para este aspecto valores variando entre 2 e 15 kg CO₂ eq./ MWh, dependendo da existência ou não de reservatório. Já os estudos da IEA- International Energy Agency (IEA, 2000), que pretendem ser uma orientação para o

setor, fornece dados variando entre 2 e 48 kg de CO₂ eq./ MWh. Por último, cabe citar os estudos da Vattenfall (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 1999, 2002a, 2002b), os únicos ICVs de hidrelétricas completos divulgados na literatura, que apresentam valores variando entre 4,0 e 11,0 kg CO₂ eq./ MWh.

Analisando estes valores pode-se concluir que, embora os valores aqui estimados para Itaipu possuam alto grau de incerteza e necessitem assim que possível de estimativas mais precisas, sua ordem de grandeza coincide com as demais estimativas disponibilizadas internacionalmente.

Desta forma pode-se admitir que, mesmo não sendo suficientemente precisas para comparação com outras hidrelétricas, os valores aqui desenvolvidos são adequados para uma primeira estimativa das emissões de gases de efeito estufa para os fins deste estudo, de ACV da geração de energia no Brasil.

D.7 Geração de energia elétrica em Itaipu

Um ponto fundamental neste estudo é a estimativa da geração de energia elétrica nos anos de operação da usina considerados na análise. Uma vez que a grande parte dos consumos de materiais e energia contabilizados neste estudo se dá no início deste período, durante a construção da usina, não sendo portanto dependente do período de operação nem função da quantidade de algum combustível utilizado, a carga ambiental por cada unidade funcional, vai depender diretamente do total de energia gerada ao longo do período de análise.

O primeiro passo para determinar a quantidade de energia gerada é estabelecer um horizonte de análise, o que é realizado no Capítulo 5, onde define-se para este estudo o período de análise de 100 anos.

Para permitir que se realizem posteriormente análises de sensibilidade, decidiu-se neste Anexo realizar os cálculos para outros períodos, de 60 e 200 anos. Desta forma, a seguir calcula-se a energia gerada em 100 anos, e em seguida aplica-se o mesmo modelo para 60 e 200 anos.

O problema de realizar esta estimativa é que, embora a potência instalada na usina seja conhecida e bem definida para cada momento deste período em função do número de unidades geradoras em operação, a energia gerada depende de diversos

fatores relacionados à operação da usina, que são agrupados no Fator de Capacidade, ou Fator de Carga (FC).

O FC expressa a relação prevista entre a potência instalada e a potência efetivamente utilizada durante um período de tempo, segundo a definição dada por SANTOS (2000). O autor ainda apresenta que para as usinas brasileiras este fator se situa em torno de 0,5 (50%).

Como dito, o FC depende de uma série de variáveis ligadas à disponibilidade hídrica e ao modo de operação da usina, tais como condições climáticas, demanda de energia, paradas de manutenção, etc.

Conforme o JORNAL DE ITAIPU (2000), o FC de projeto para Itaipu era de 68%, o que resultaria numa energia média anual de 75.000 GWh. Este valor foi há muito ultrapassado, como mostra a Tabela D.70 a seguir, que apresenta a energia gerada anualmente pela usina desde sua inauguração (ITAIPU BINACIONAL, 2002). A Tabela D.70 também fornece a quantidade de turbinas operando em cada ano e o FC calculado, tendo sempre como base o valor médio da quantidade de unidades geradoras em operação.

Tabela D.70– Dados de geração até 2002 (ITAIPU BINACIONAL, 2002).

ANO	Geração (GWh)	Unidades em Funcionamento	FC
1984	277	0 – 2	4,5%
1985	6.327	2 – 3	41,3%
1986	21.853	3 – 6	79,2%
1987	35.807	6 – 9	68,7%
1988	38.508	9 – 12	59,8%
1989	47.230	12 – 15	57,1%
1990	53.090	15 -16	55,9%
1991	57.517	16 – 18	55,2%
1992	52.268	18	47,4%
1993	59.997	18	54,4%
1994	69.394	18	62,9%
1995	77.212	18	70,0%
1996	81.654	18	74,0%
1997	89.237	18	80,8%
1998	87.845	18	79,6%
1999	90.001	18	81,5%
2000	93.428	18	84,6%
2001	79.307	18	71,9%
2002	82.914	18	75,1%
TOTAL	1.040.952		

Como se pode ver, o FC de Itaipu tem variado bastante. Apenas para facilitar a visualização destes dados, a Figura D.02 apresenta os mesmos na forma de gráficos, de energia gerada e FC no tempo.

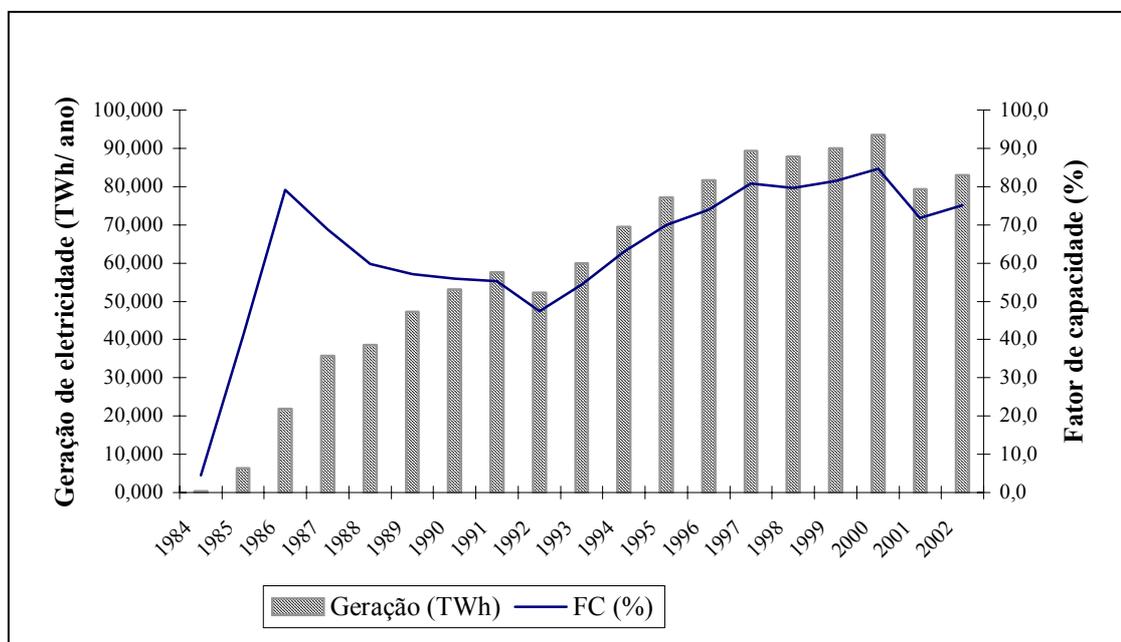


Figura D.02– Energia gerada e fator de capacidade de Itaipu desde a inauguração (adaptado de ITAIPU BINACIONAL, 2002).

A estimativa do FC é de extrema complexidade, porém para nosso estudo é imprescindível. Uma vez que não foram obtidos valores deste fator para os anos vindouros, estes fatores foram estimados com base nos dados existentes até o momento.

Para que seja feita esta estimativa, o ideal seria recorrer a estimativas de potencial pluviométrico e de paradas programadas da usina. No entanto estes dados tampouco estão disponíveis, e embora esta metodologia apresente uma incerteza bastante grande utilizou-se para cálculo do FC dos próximos anos a média aritmética do FC dos últimos 10 anos, ou seja, 78,5%.

Utilizando esta hipótese simplificadora, pode-se calcular a energia gerada no período de análise de 100 anos dividindo-o em três momentos:

- de 1984 até 2002: energia gerada dada por ITAIPU BINACIONAL (2002), igual a 1.040.952 GWh;

- 2003 e 2004 (antes do início da operação das novas unidades geradoras): aplicação do FC= 78,5% para a potência instalada de 12,6 GW, resultando em 173.290 GWh, e
- de 2005 até 2084: aplicação do FC= 78,5% sobre a potência instalada após a expansão, de 14,0 GW, o que equivale a 7.701.792 GWh.

Somando estes valores, chega-se a estimativa de geração de 8.916.034 GWh para os 100 anos considerados de operação de Itaipu.

Para calcular a energia gerada em 60 e 200 anos procedeu-se da mesma forma, chegando aos valores de 5.065.138 GWh para 60 anos e 18.543.274 GWh para 200 anos.

Uma última observação diz respeito à energia elétrica consumida pela usina durante seu funcionamento, para operação de suas diversas instalações, desde escritórios até bombas d'água e mecanismos de acionamento dos equipamentos permanentes.

Embora em comparação com a energia gerada pela usina este consumo seja bastante reduzido será contabilizado, a exemplo do que se encontra nos estudos internacionais semelhantes.

Uma vez que não foi possível obter o valor deste consumo ano a ano junto à empresa, optou-se por usar um dado de literatura. Desta forma, contatou-se no relatório anual de 1983 (ITAIPU BINACIONAL, 1984) que entre Maio e Dezembro de 1983 foram consumidos 3.157 MWh de eletricidade, o que resulta numa média de 394,6 kWh/ mês. De modo a facilitar o uso deste dado, garantindo novamente a flexibilidade do modelo no programa SimaPro, decidiu-se adotar uma estimativa para o consumo de eletricidade, de 4,73 MWh/ ano.

D.8 Consolidação das estimativas dos processos do ciclo de vida de Itaipu.

A Tabela D.71 a seguir apresenta a consolidação, por processo, das estimativas deste Anexo.

Tabela D.71- Resumo dos dados do Anexo D, com valores de consumos e emissões referentes aos 100 anos de operação.

Processo	Sub- Processo/ Aspecto		Valor para os 100 anos			Unid	
			CONSTRUÇÃO	OPERAÇÃO	TOTAL		
Obras de Infra-estrutura							
Transporte dos operários	Transporte de ônibus		15,0.10 ⁶	0	15,0.10 ⁶	km	
Escavações e obras de terra	Consumo de rocha		32,0.10 ⁶	0	32,0.10 ⁶	m ³	
	Consumo de terra		23,6.10 ⁶	0	23,6.10 ⁶	m ³	
	Explosivos		-	-	-		
	Consumo diesel		295.000	0	295.000	t	
	Operação Máquinas de Constr.	Transporte diesel	Transporte caminhão	3,062.10 ⁸	0	3,062.10 ⁸	t.km
		Emissões atmosf.	CO	4.620,19	0	4.620,19	t
	Hidrocarbonetos		845,43	0	845,43	t	
	NO _x		12.587,47	0	12.587,47	t	
	Aldeídos		302,76	0	302,76	t	
	SO _x		1.297,93	0	1.297,93	t	
	Particulado		873,53	0	873,53	t	
	CO ₂		926.300,00	0	926.300,00	t	
	Uso do solo		0	1.350	1.350	km ²	
Produção concreto	Consumo cimento		2.475.828	0	2.475.828	t	
	Transporte cimento	Transporte caminhão	2,591.10 ⁹	0	2,591.10 ⁹	t.km	
	Consumo cinzas		299.519	0	299.519	t	
	Transporte cinzas	Transporte caminhão	3,903.10 ⁸	0	3,903.10 ⁸	t.km	
	Consumo água		2,158.10 ⁶	0	2,158.10 ⁶	m ³	
	Consumo areia natural		3,675.10 ⁶	0	3,675.10 ⁶	t	
	Dragagem areia	Elettricidade	438,6	0	438,6	MWh	
	Consumo aço (estrutural)		478.270	0	478.270	t	
	Transporte aço (estrutural)	Transporte caminhão	6,11.10 ⁸	0	6,11.10 ⁸	t.km	
	Consumo madeira		5.270	0	5.270	t	
	Canteiro de obras	Consumo de aço	37.588	0	37.588	t	
		Elettricidade	2,6.10 ⁶	0	2,6.10 ⁶	MWh	
	Iluminação obra	Elettricidade	128,5	0	128,5	MWh	
Equipam. Permanentes	Turbina	Consumo de aço	65.734,0	97.943,7	163.677,7	t	
	Gerador	Consumo de aço	73.662,0	223.932,5	297.594,5	t	
		Consumo de cobre	3.800,0	11.552,0	15.352,0	t	
	Transformador	Consumo de aço	7.918,0	22.487,1	30.405,1	t	
		Consumo de cobre	1.680,0	4.771,2	6.451,2	t	
	Conduto Forçado	Consumo de aço	18.772,0	44.395,8	63.167,8	t	
	Outros	Consumo de aço	115.170,0	80.619,0	195.789,0	t	
	Total aço equipamentos permanentes		281.256	469.378	750.634	t	
	Total cobre equipamentos permanentes		5.480	16.323	21.803	t	
	Óleo lubrificante		75,0	0	75,0	M ³	
	Óleo de transformador		168,3	0	168,3	m ³	
	Emissão de Gases de Efeito Estufa	CO ₂	0	9,644.10 ⁶	9,644.10 ⁶	t	
CH ₄		0	1,175.10 ⁶	1,175.10 ⁶	t		
Consumo próprio eletricidade			0	473,0	473,0	MWh	
Geração energia			0	8.916.034	8.916.034	GWh	

Para inserir estes processos no SimaPro, foi adotada uma estrutura ligeiramente distinta desta até aqui apresentada. A Figura D.03 apresenta esta estrutura.

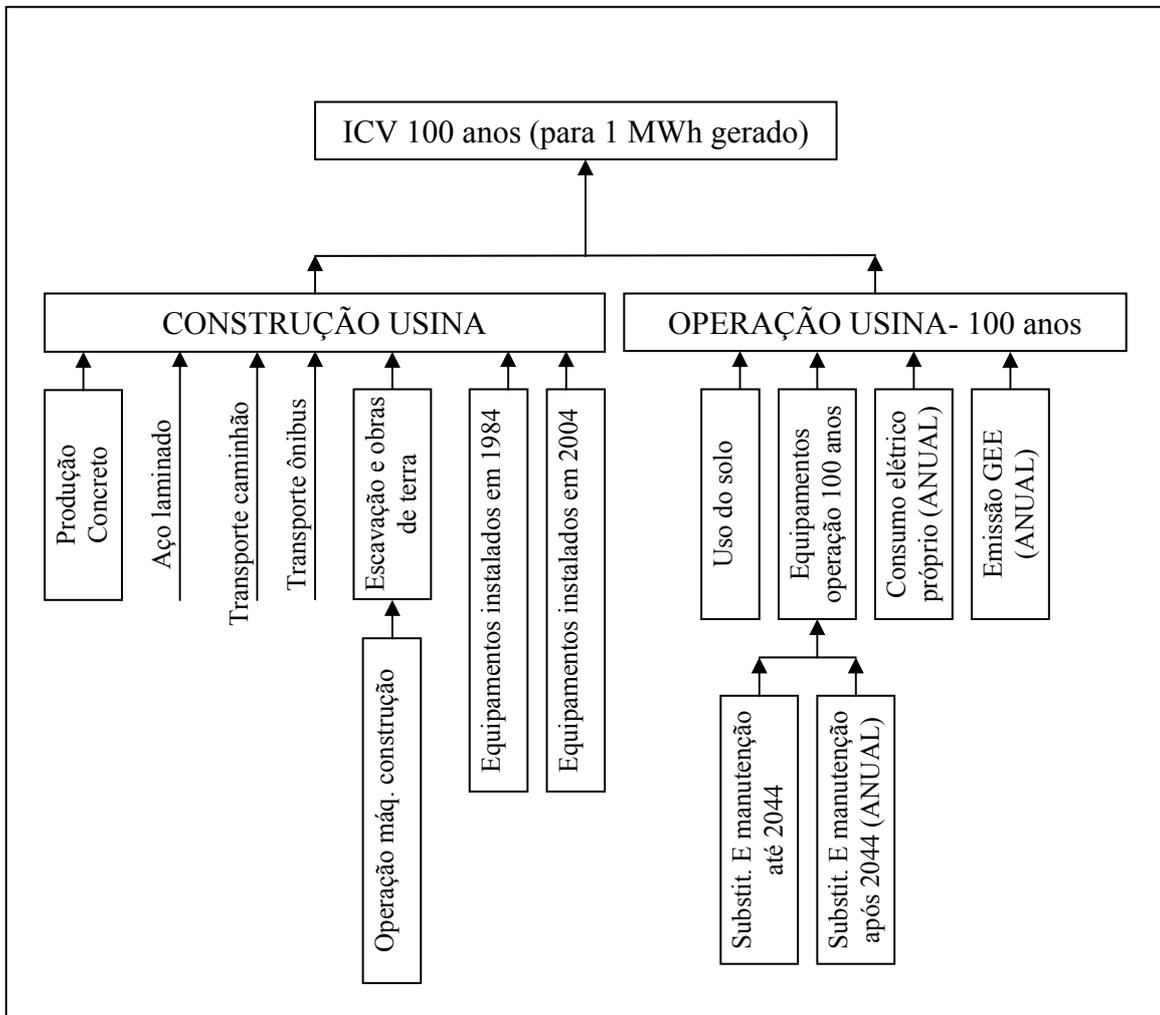


Figura D.03- Estrutura dos processos no SimaPro.

De modo bastante sucinto, pode-se apresentar o conteúdo de cada dos processos da Figura D.03 como sendo o seguinte:

- *produção de concreto*: consumo de cimento; transporte do cimento; transporte de cinzas; consumo de água, areia e madeira para obtenção do concreto; aço e eletricidade para canteiro; eletricidade da iluminação da obra e para a dragagem da areia;
- *aço estrutural*: não é um processo em si, consiste no consumo de *aço laminado* para estimar o aço estrutural usado no concreto de Itaipu (insumo a ter o ciclo de vida estimado no Anexo E);

- *transporte de caminhão*: é o transporte do aço estrutural;
- *transporte de ônibus*: transporte dos operários entre os alojamentos e o canteiro de obras;
- *escavação e obras de terra*: consumo de terra e rocha nas escavações e “operação das máquinas de construção” (consumo de diesel e suas emissões);
- *equipamentos instalados em 1984 e equipamentos instalados em 2004*: são os equipamentos permanentes instalados nos dois momentos da construção da usina;
- *uso solo*: Estima o uso de solo para inundação do reservatório;
- *equipamentos operação 100 anos*: são os equipamentos utilizados na fase de operação da usina por 100 anos, divididos em:
 - *substituição e manutenção dos equipamentos até 2044*: idem ao descrito neste Anexo, e
 - *substituição e manutenção dos equipamentos após 2044*: 40 anos das substituições e manutenções anuais após 2044 estimadas.
- *consumo elétrico próprio (ANUAL)*: 100 anos de consumo de eletricidade estimado para operação da usina, e
- *emissão de gases de efeito estufa (ANUAL)*: 100 anos das emissões anuais estimadas.

De modo a consolidar os valores das estimativas, o processo “ICV 100 anos (para 1 MWh gerado)” soma a Construção e a Operação, modificando a base de cálculo para a unidade funcional, o MWh. Para tanto, antes de somar multiplica cada uma destas duas fases do ciclo de vida por um fator de $1,121575 \cdot 10^{-10}$, que representa o inverso da energia estimada para os 100 anos de operação da usina (8.916.034.000 MWh).

ANEXO E - ESTIMATIVAS DOS PROCESSOS DE CICLO DE VIDA DOS INSUMOS

Como já apresentado e discutido no corpo principal do texto, neste estudo trabalha-se com dados primários até onde é possível obter informações específicas para a usina de Itaipu, ou seja, o consumo de seus principais insumos, como o cimento, aço, diesel, etc. Estas estimativas são realizadas no Anexo D.

Para que se complete o ciclo de vida da usina de Itaipu, faz-se necessário regredir as estimativas dos insumos pelos processos necessários à sua obtenção, até a extração de suas matérias-primas da natureza, procedimento apresentado neste Anexo.

Desta forma, neste Anexo são estimados, para a situação o mais próximo possível da contemporânea à construção de Itaipu, os aspectos ambientais dos processos necessários para obtenção dos seguintes insumos: petróleo e derivados, eletricidade, transportes (rodoviário, de ônibus, ferroviário e marítimo – petroleiro e navio graneleiro), cimento, aço e cobre.

As estimativas dos aspectos destes processos de obtenção dos insumos foram realizadas de modo distinto em cada caso, devido a diferentes necessidades de adequação dos dados obtidos, sempre tendo em vista realizar as estimativas com o máximo de dados nacionais e da época, de modo a buscar o máximo de representatividade para a situação da usina.

Uma vez que este estudo se insere num projeto mais amplo, tentou-se na medida do possível adotar dados e estruturas de ciclo de vida dos insumos semelhantes aos utilizados pelo pesquisador do GP2 Alexandre Yokote (YOKOTE, 2003), pesquisador que realizou seu mestrado levantando o ICV da distribuição de energia elétrica. Assim, alguns insumos tiveram seus processos obtidos por modificações dos dados utilizados por esta referência. No entanto, uma vez que YOKOTE (2003) tem como escopo temporal a época atual e este estudo a década de setenta, muitos dados, principalmente dos ciclos de vida do cimento e do aço, não puderam ser utilizados.

Resumidamente, podemos dizer que as estimativas deste Anexo foram realizadas com as seguintes fontes de dados:

- derivados de petróleo: uso do perfil de refino brasileiro atual, com os aspectos ambientais de uma refinaria típica obtida de uma base de dados para ACV,

desenvolvido por um instituto de pesquisas australiano, a exemplo do realizado por YOKOTE (2003). Esta refinaria foi alimentada por petróleo obtido de um mix segundo dados nacionais da época, incluindo as etapas de transporte e extração estimadas com auxílio de bases de dados internacionais de ACV;

- eletricidade: matriz energética da época, com a hidreletricidade dada como fluxo elementar e a energia termelétrica estimada de modo semelhante a YOKOTE (2003), com os aspectos ambientais da queima dos diferentes combustíveis estimados com o uso de bases de dados internacionais de ACV;
- transportes: para transporte rodoviário, em caminhão de 30t, e de ônibus, foram aplicados fatores de consumo de combustível e de emissão atmosférica dados pelo governo britânico. Sobre o transporte ferroviário, a composição dos trens foi estimada com dados nacionais, e os fatores de consumo e emissão são igualmente britânicos, da mesma fonte. Para o transporte marítimo, foram usadas bases de dados de ACV, tanto para os navios petroleiros como para os graneleiros;
- cimento: uso de dados nacionais da época sobre a contribuição das diferentes rotas de produção, e dados recentes e da época dos aspectos ambientais, aplicados sobre uma estrutura de identificação de aspectos usada por YOKOTE (2003). Esta estrutura foi obtida de uma base de dados para ACV desenvolvida por um instituto de pesquisa em ACV da Austrália, que foi cuidadosamente verificada, mas após mostrar-se inadequada a este caso teve mantida apenas a estrutura de processos e aspectos ambientais;
- aço: levantamento realizado totalmente com dados nacionais, alguns da época e outros mais atuais. Este cuidado se justifica pelas grandes diferenças da indústria siderúrgica nacional em relação às de outros países, principalmente no que se refere ao uso de carvão vegetal no Brasil, como será oportunamente apresentado, e
- cobre: adaptação da base desenvolvida por YOKOTE (2003), que modificou uma base de dados específica de ACV.

Deve-se ressaltar que os resultados obtidos são condicionados em grande parte às condições da década de setenta, o que faz com que embora a metodologia, e

inclusive alguns dados, possam ser utilizados em outras situações, não se recomenda o uso destes dados em estudos de ACV no Brasil em realidades distintas daquela aqui apresentada sem uma prévia avaliação de sua representatividade.

A seguir apresentam-se as estimativas para cada classe de insumo, sendo que ao final é apresentada uma tabela com seu inventário consolidado para incorporação nos dados obtidos para Itaipu.

E.1 Petróleo e derivados

Uma vez que os derivados de petróleo, principalmente o diesel, são usados em larga escala não só no ciclo de vida da usina, mas também nas etapas produtivas de diversos insumos aqui considerados, iniciou-se a adequação das bases de dados pela obtenção do petróleo e seus derivados.

Admitiu-se para esta estimativa que o processo de refino é razoavelmente padronizado entre as refinarias, decidindo-se assim utilizar dados internacionais para a quantificação dos aspectos ambientais deste processo, de acordo com a estimativa realizada por YOKOTE (2003). Uma vez que não se obteve nenhum dado da época para os derivados, decidiu-se trabalhar com os dados apresentados por YOKOTE (2003), representativos do perfil de refino brasileiro no ano de 2001, disponibilizado pela ANP- Agência Nacional de Petróleo (BRASIL, 2002, *Apud* YOKOTE, 2003).

Desta forma, utiliza-se o perfil de refino dado por YOKOTE (2002), que apresenta a quantidade de cada derivado obtido de uma produção total de 100 m³ de derivados. Na Tabela E.01 tem-se estes valores dados em unidades de massa.

Tabela E.01 - Perfil de refino admitido (YOKOTE, 2003)

Entradas		Saídas	
Petróleo	96,54 m ³ (ou 84.569 kg)	Asfalto	1.685 kg;
		Coque	1.850 kg;
		Gasolina	14.587 kg;
		Gasolina de aviação	69 kg
		GLP	4.189 kg
		Óleo lubrificante	813 kg
		Nafta	7.075 kg
		Óleo combustível	18.697 kg

(continua)

Tabela E.01- (continuação)

Entradas		Saídas	
		Óleo diesel	29.154 kg
		Parafina	200 kg
		Querosene de aviação	2.973 kg
		Querosene de iluminação	189 kg
		Solvente	487 kg
		Outros	570 kg

Quanto às emissões do processo de refino, utiliza-se os dados de YOKOTE (2003), obtidos numa base de dados do governo australiano (RMIT, 2003), como sendo:

- emissões atmosféricas:
 - CO₂: 8.315,34 g/ t petróleo refinado;
 - CH₄: 37,98 g/ t petróleo refinado;
 - NO_x: 5,85 g/ t petróleo refinado;
 - CO: 26,37 g/ t petróleo refinado;
 - COV (exceto metano): 955,55 g/ t petróleo refinado;
 - poeira: 10,15 g/ t petróleo refinado;
 - SO_x: 4,88 g/ t petróleo refinado;
 - metil mercaptano: 0,01 g/ t petróleo refinado;
 - hidrocarbonetos: 0,02 g/ t petróleo refinado;
 - H₂S: 0,21 g/ t petróleo refinado;
- emissões a água:
 - Cl⁻: 24,36 g/ t petróleo refinado;
 - Na: 16,32 g/ t petróleo refinado, e
 - óleo: 7,12 g/ t petróleo refinado.

Embora estes dados sejam supostamente subestimados para o caso de Itaipu, uma vez que à época a tecnologia de controle de emissões não era tão difundida ou avançada quanto à época atual, na ausência de dados mais precisos estes foram aplicados diretamente.

Sobre o consumo energético da refinaria, considerou-se neste estudo o mesmo que em YOKOTE (2003), para quem a refinaria é auto-suficiente, não consumindo outras formas de energia.

Uma vez que neste processo de refino do petróleo são gerados diversos produtos, é necessário que se realize algum tipo de alocação, para atribuir a cada um deles a

devida carga ambiental. Neste caso, o critério de alocação adotado foi o mesmo que em YOKOTE (2003), baseado no poder calorífico de cada combustível. Para tanto, tomou-se diretamente os seguintes fatores de alocação calculados por YOKOTE (2003)

- asfalto: 1,91%;
- coque: 1,77%;
- gasolina: 18,47%;
- gasolina de aviação: 0,09%;
- GLP: 5,56%;
- óleo lubrificante: 0,99%;
- nafta: 9,04%;
- óleo combustível: 21,28%;
- óleo diesel: 35,37%;
- parafina: 0,24%;
- querosene de aviação: 3,72%;
- querosene de iluminação: 0,24%;
- solvente: 0,62%, e
- outros: 0,7%.

Quanto à origem do petróleo no entanto, devido à situação peculiar de abastecimento atual no Brasil, julgou-se que os dados de YOKOTE (2003) trariam grande incerteza às estimativas, e desta forma buscando aproxima-las da realidade da época, levantou-se junto à PETROBRAS (2003) dados de 1977.

Segundo dados da PETROBRAS (2003), em 1977 a produção de diesel nas suas refinarias foi de 265 mil barris/ dia, enquanto o consumo de diesel no Brasil no mesmo ano foi de 255 mil barris/ dia. Assim, admitiu-se a hipótese de que todo o diesel consumido no Brasil em 1977 foi refinado nas refinarias da empresa no Brasil, não havendo importação deste insumo.

De acordo com dados da PETROBRAS (2003), em 1977 foram processados nas refinarias da empresa no Brasil 948 mil barris de petróleo/ dia, dos quais 165 mil (17,4%) eram de origem nacional, e 783 mil (82,6%) era petróleo de origem estrangeira. Do petróleo de origem brasileira, segundo a empresa, em 1977 75,2% do

petróleo era extraído *on-shore*, e 24,8% em plataformas *off-shore* (PETROBRAS, 2003).

Uma vez que obter dados sobre os aspectos da extração do petróleo foge ao escopo deste trabalho, utilizou-se a exemplo de YOKOTE (2003), bases de dados internacionais para aproximar a produção nacional de petróleo.

Para a produção *off-shore*, utilizou-se a base de dados desenvolvida pela Universidade de Delft, na Holanda, que contempla dados médios de diversos produtores de petróleo off-shore do Mar do Norte, para os anos de 1990 a 1994, e está disponível na base de dados *IDEMAT 2001- northsea oil I* do SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003). A Tabela E.02 a seguir apresenta os valores dos aspectos ambientais deste processo.

Tabela E.02- Quantificação de aspectos ambientais para a extração de petróleo *off shore* (PRE CONSULTANTS, 2003)

Entradas			Saídas		
Bauxita	0,0004	Kg	Petróleo	1,00	Kg
Petróleo	1,01	Kg	Emissões atmosféricas		
Gas natural	0,055	Kg	CO	0,00007	Kg
Energia inespecifica	2,66	MJ	CO2	0,152	Kg
Água	0,0095	Kg	CxHy	0,0018	Kg
			Poeira	0,00023	Kg
			HCl	0,00001	Kg
			NOx	0,0022	Kg
			SOx	0,00006	Kg
			Efluentes líquidos		
			Petróleo	0,000035	Kg
			H2	0,000031	Kg
			Íons metálicos	0,000005	Kg
			Fenol	0,000001	Kg
			Resíduos sólidos		
			Resíduo mineral	0,0011	Kg
			Escória	0,00001	Kg
			Emissões não materiais		
			Uso do solo	2,06E-05	m ²

Para a produção *on-shore* no Brasil, foi utilizado o perfil obtido pelo Pre-Consultants, usando dados médios de diversos produtores da Europa ocidental, entre os anos de 1985 e 1989, disponibilizado na base de dados *Data Archive - mineral oil winning*, do SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003). A Tabela E.03 apresenta os valores dos aspectos quantificados.

Tabela E.03- Quantificação de aspectos ambientais para a extração de petróleo on shore (PRE CONSULTANTS, 2003)

Entradas			Saídas		
Petróleo	1,0	Kg	Petróleo	1,00	Kg
Energia inespecífica	2,0	MJ	Emissões atmosféricas		
			CO	0,00001	Kkg
			CO2	0,17	Kg
			crude oil	0,00119	Kg
			CxHy	0,00001	Kg
			CxHy aliphatic	0,00228	Kg
			dust (SPM)	0,00007	Kg
			H2	0,00003	Kg
			H2S	0,00001	Kg
			NOx	0,0004	Kg
			SO2	0,00102	Kg
			Efluentes líquidos		
			COD	0,00001	Kg
			crude oil	0,00001	kg

Quanto ao petróleo importado, como não foi obtida da empresa a origem das importações de óleo na época, e tendo em vista que em 1996 46,5% das importações de petróleo vinham do Oriente Médio e 25,5% dos países da América do Sul (PETROBRAS, 2003), e ainda que na década de 70 a origem do petróleo era ainda mais concentrada nos países do Oriente Médio, admitiu-se de modo simplificado que todo o petróleo importado à época vinha desta região.

Para estimar a extração do petróleo importado do Oriente Médio, utilizou-se uma base de dados da Pre-Consultants, de petróleo produzido fora do mar do Norte, para diversos produtores da Europa Ocidental, entre os anos de 1985 e 1989, disponível na base *Data Archive - crude oil non N-sea P*, do SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003). A Tabela E.04 a seguir apresenta os aspectos quantificados nesta base.

Tabela E.04- Quantificação de aspectos ambientais para a extração de petróleo importado (PRE CONSULTANTS, 2003).

Entradas			Saídas		
Bauxita	0,0004	Kg	Petróleo	1,00	Kg
Argila	0,00004	Kg	Emissões atmosféricas		
Petróleo	1,0	Kg	CO	0,00007	Kg
Energia do Carvão	0,01	MJ	CO2	0,18	Kg

(continua)

Tabela E.04- (continuação)

Entradas			Saídas		
Energia Hidrelétrica	0,01	MJ	HC	0,0017	Kg
Energia de gás natural	2,65	MJ	Poeira	0,00022	Kg
Energia de óleos	0,64	MJ	Metais pesados	0,000001	Kg
Energia de urânio	0,01	MJ	NOx	0,0022	Kg
Minério de Ferro	0,0002	Kg	SOx	0,0009	Kg
Calcário	0,0002	Kg	Efluentes líquidos		
Rocha salina	0,0002	Kg	Acido (H+)	0,00003	Kg
Água	0,033	Kg	Cl-	0,00001	Kg
			COD	0,000001	Kg
			Petróleo	0,00002	Kg
			HC	0,00002	Kg
			Orgânicos dissolvidos	0,00002	Kg
			Sólidos dissolvidos	0,00001	Kg
			Íons metálicos	0,000005	Kg
			Sólidos suspensos	0,00007	Kg
			Resíduos sólidos		
			Resíduos não inertes	0,0015	kg

Sobre o transporte do petróleo proveniente do Oriente Médio, tem-se que quando a PETROBRAS foi criada esta possuía uma frota de 22 navios tanque, com capacidade total de transporte de 221.295 t (PETROBRAS, 2003). No entanto atualmente a empresa trabalha com navios de capacidade entre 70.000 e 100.000 t (PETROBRAS, 2003). Desta forma, decidiu-se usar para esta estimativa uma base de dados internacional referente ao transporte em petroleiros de capacidade 88.750 t, como será exposto mais adiante no item referente às estimativas de transportes.

A distância pela qual o petróleo foi transportado, entre o Oriente Médio e o Brasil, foi estimada como 20.000 km, a partir de medição aproximada sobre um mapa-múndi (PEREIRA, 1985).

Tendo estas informações, o fluxograma do ciclo de vida dos derivados de petróleo, sem seus aspectos ambientais, fica como apresentado na Figura E.01, a seguir.

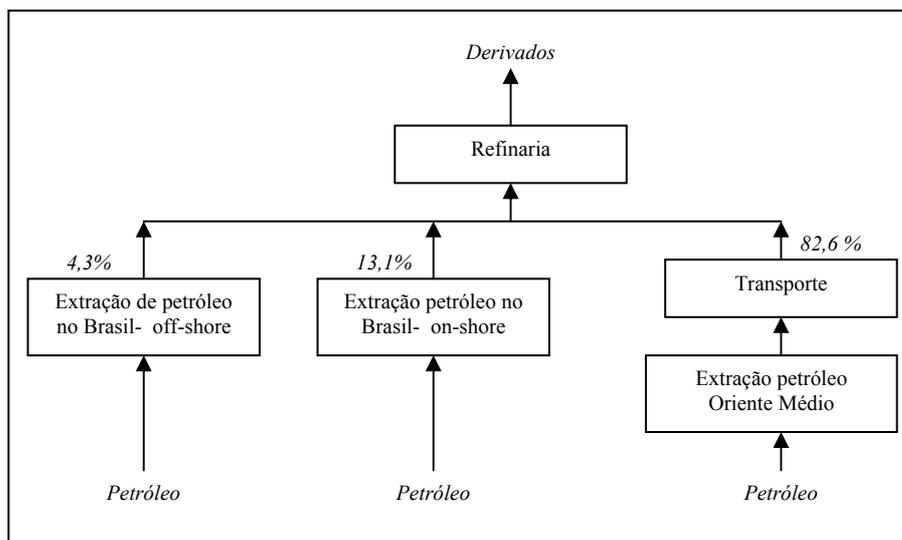


Figura E.01- Ciclo de vida dos derivados de petróleo.

O inventário do ciclo de vida dos derivados de petróleo usados no ciclo de vida de Itaipu é apresentado na Tabela E.04.

Tabela E.05- Inventário de ciclo de vida dos derivados de petróleo.

	Unid.	Óleo Diesel	Óleo Combustível	Óleo Lubrificante
		(/ kg diesel)	(/ kg óleo comb.)	(/ kg óleo lubrif.)
Consumo de Recursos				
Água	kg	3,28E-02	3,08E-02	3,29E-02
Argila	kg	3,92E-05	3,68E-05	3,93E-05
Bauxita	kg	4,12E-04	3,87E-04	4,14E-04
Calcita	kg	1,96E-04	1,84E-04	1,97E-04
Energia (inespec.)	MJ	4,47E-01	4,19E-01	4,48E-01
En. Carvão	MJ	9,80E-03	9,19E-03	9,84E-03
En. Gás natural	MJ	2,60E+00	2,44E+00	2,61E+00
En. hidrelétrica	MJ	9,80E-03	9,19E-03	9,84E-03
En. Petróleo	MJ	6,27E-01	5,88E-01	6,30E-01
En. Urânio	MJ	9,80E-03	9,19E-03	9,84E-03
Gás Natural	kg	2,82E-03	2,64E-03	2,83E-03
Min. Ferro	kg	1,96E-04	1,84E-04	1,97E-04
Petróleo	kg	1,19E+00	1,11E+00	1,19E+00
Sal gema	kg	1,96E-04	1,84E-04	1,97E-04
Emissões atmosféricas				
CH4	kg	4,50E-05	4,22E-05	4,52E-05
CO	kg	1,48E-03	1,39E-03	1,48E-03
CO2	kg	6,74E-01	6,32E-01	6,77E-01
COV-exceto CH4	kg	1,13E-03	1,06E-03	1,14E-03

(continua)

Tabela E.05- (continuação)

	Unid.	Óleo Diesel	Óleo Combustível	Óleo Lubrificante
		(/ kg diesel)	(/ kg óleo comb.)	(/ kg óleo lubrif.)
Emissões atmosféricas				
Fuligem	kg	1,37E-05	1,29E-05	1,38E-05
H2	kg	4,66E-06	4,37E-06	4,68E-06
H2S	kg	1,81E-06	1,69E-06	1,81E-06
Hidrocarbonetos	kg	2,54E-03	2,39E-03	2,55E-03
Hidrocarb. Alifát.	kg	3,54E-04	3,32E-04	3,55E-04
HCl	kg	5,12E-07	4,80E-07	5,14E-07
Metais pesados	kg	9,80E-07	9,19E-07	9,84E-07
Metil- mercaptano	kg	1,39E-08	1,30E-08	1,39E-08
NOx	kg	1,10E-02	1,03E-02	1,10E-02
Petróleo	kg	1,85E-04	1,73E-04	1,85E-04
Poeira	kg	2,50E-04	2,35E-04	2,51E-04
SO2	kg	7,41E-03	6,95E-03	7,44E-03
SOx	kg	8,91E-04	8,36E-04	8,94E-04
Efluentes líquidos				
Ácido (H+)	kg	2,94E-05	2,76E-05	2,95E-05
Cl-	kg	3,87E-05	3,63E-05	3,88E-05
DQO	kg	2,53E-06	2,38E-06	2,54E-06
Fenol	kg	5,12E-08	4,80E-08	5,14E-08
H2	kg	1,59E-06	1,49E-06	1,59E-06
Hidrocarbonetos	kg	1,96E-05	1,84E-05	1,97E-05
Íons metálicos	kg	5,16E-06	4,84E-06	5,18E-06
Óleo	kg	8,45E-06	7,92E-06	8,48E-06
Orgân. dissolvidos	kg	1,96E-05	1,84E-05	1,97E-05
Petróleo	kg	2,29E-05	2,15E-05	2,30E-05
Sódio	kg	1,94E-05	1,82E-05	1,94E-05
Sulfato	kg	9,80E-06	9,19E-06	9,84E-06
Sulfito	kg	6,86E-05	6,44E-05	6,89E-05
Resíduos sólidos				
Escória	kg	5,12E-07	4,80E-07	5,14E-07
Resíduo mineral	kg	5,63E-05	5,28E-05	5,65E-05
Resíduo não inerte	kg	1,47E-03	1,38E-03	1,48E-03
Aspectos não materiais				
Uso do solo	m2	1,05E-06	9,90E-07	1,06E-06

E.2 Eletricidade

Assim como os derivados de petróleo, a eletricidade consiste num insumo de grande importância para a produção de outros insumos aqui estudados. Para criar uma base de dados de eletricidade para o ano de 1977, seguiu-se a metodologia de YOKOTE (2003), alterando os valores da composição da matriz energética para os valores referentes ao ano de 1977.

Segundo ELETROBRAS (1978), em 1977 a geração bruta de eletricidade no Brasil foi estimada em 99.869 GWh. Destes, de acordo com a referência, 92.943 GWh eram de origem hidrelétrica (93,1%) gerados em usinas que somavam 19.198 MW de potência instalada (84,2%), enquanto 6.926 (6,9%) era de origem termelétrica, gerados em usinas com o total de 3.599 MW de potência instalada (15,8%).

Uma vez que não foram localizados dados dos combustíveis utilizados pelas centrais termelétricas brasileiras em 1977, utilizou-se a composição do ano de 1979, admitindo que não houveram variações significativas no período. Esta composição é apresentada na Tabela E.05.

Tabela E.06- Composição do uso de combustíveis nas usinas termelétricas brasileiras em 1978 (ELETROBRAS, 1983).

Combustível	Potência instalada com o combustível (MW)	%
Diesel	1.716	36,1
Óleo combustível	2.531	53,3
Carvão	501	10,6

Aplicando a mesma proporção destes resultados aos dados de 1977, temos o seguinte perfil:

- hidreletricidade: 93,1% da energia gerada;
- termelétricidade: 6,9% da energia gerada, sendo:
 - 36,1% com diesel;
 - 53,3% com óleo combustível;
 - 10,6% com carvão;

Para compor a base de dados, utilizou-se os seguintes modelos de geração:

- energia hidrelétrica: não foi considerado nenhum aspecto ambiental, sendo esta tratada como fluxo elementar, e
- energia termelétrica: conforme realizado por YOKOTE (2003), admitiu-se um rendimento geral de conversão de 30,9%, obtido do BEN- Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2001), *Apud* YOKOTE (2003). Para cada combustível utilizado, a energia gerada na forma de calor é estimada com base no poder calorífico dado para cada combustível, alterando apenas o poder calorífico do carvão para adaptar esta base aos valores do carvão nacional, sendo as emissões

obtidas da base de dados do *IDEMAT- 2001*, desenvolvida pela Universidade de Delft e disponíveis no SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003).

Estes valores são apresentados na Tabela E.07.

Tabela E.07- Valores de geração de calor e emissões por combustível (PRE CONSULTANTS, 2003)

	Queima Diesel (por kg diesel)	Queima Carvão (por kg carvão)	Queima Óleos* (por kg óleos)
Calor (MJ)	45,12 MJ	30,56 MJ	44,44 MJ
CO ₂ (g)	3.392	2.624	3.392
SO _x (g)	16,7	11,1	16,7
NO ₂ (g)	6,5	4,4	6,5
CO(g)	0,55	0,5	0,55
Hidrocarbonetos(g)	0,77	0,3	0,77
Fuligem (g)	0,3	8,8	0,3
Poeira (g)	1,3	0,4	1,3

* Composição dos óleos: Óleo diesel: 79,6 %; Óleo combustível: 20,4 %;

Neste modelo não foi considerada a distribuição da eletricidade pela rede elétrica, o que não se mostra um problema, pois a maioria dos usuários deste estudo são grandes consumidores (siderúrgicas, cimenteiras, refinarias, etc) e que recebem eletricidade em alta tensão. No entanto, admitiu-se uma perda por transmissão, de 3%, a exemplo do realizado por YOKOTE (2003).

Desta forma, o fluxograma do ciclo de vida da geração de eletricidade que irá alimentar os ciclos de vida dos insumos, é dado como apresentado na Figura E.02.

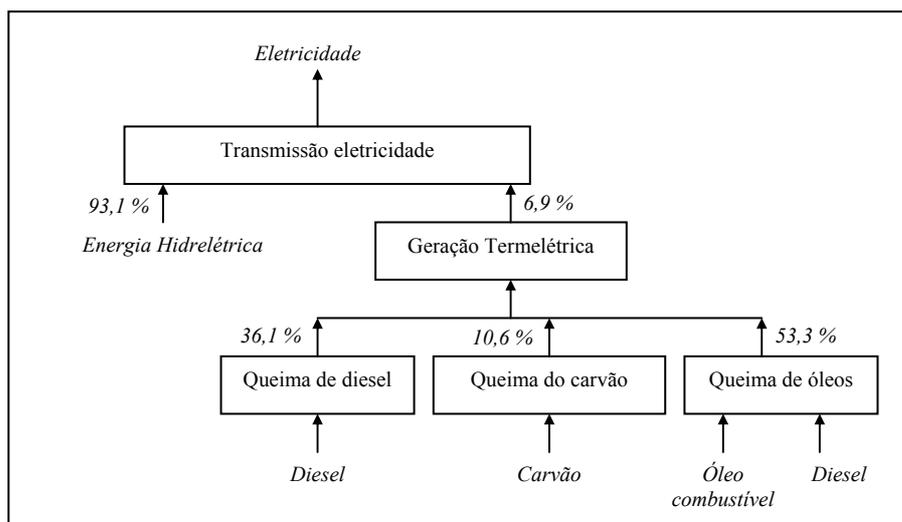


Figura E.02- Ciclo de Vida da eletricidade

O sistema representado na Figura E.02 tem estimado o inventário dado pela Tabela E.07, para a oferta de 1 MJ de eletricidade transmitida.

Tabela E.08- Inventário de ciclo de vida da eletricidade transmitida.

	Unid.	Eletricidade transmitida (/ MJ)
Consumo de Recursos		
Água	kg	0,00015
Argila	kg	1,8E-07
Bauxita	kg	1,9E-06
Calcita	kg	9E-07
Carvão	kg	0,0008
Energia (inespec.)	MJ	0,00204
En. Carvão	MJ	4,5E-05
En. Gás natural	MJ	0,0119
En. hidrelétrica	MJ	0,96
En. Petróleo	MJ	0,00287
En. Urânio	MJ	4,5E-05
Gás Natural	kg	1,3E-05
Min. Ferro	kg	9E-07
Petróleo	kg	0,00542
Sal gema	kg	9E-07
Emissões atmosféricas		
CH4	kg	2,1E-07
CO	kg	9,7E-06
CO2	kg	0,0208
COV-exceto CH4	kg	5,2E-06
Fuligem	kg	8,5E-06
H2	kg	2,1E-08
H2S	kg	8,3E-09
Hidrocarbonetos	kg	1,5E-05
Hidrocarb. Alifát.	kg	1,6E-06
HCl	kg	2,3E-09
Metais pesados	kg	4,5E-09
Metil- mercaptano	kg	6,3E-11
NO2	kg	3,3E-05
NOx	kg	5E-05
Petróleo	kg	8,4E-07
Poeira	kg	7,5E-06
SO2	kg	3,4E-05
SOx	kg	9E-05
Efluentes líquidos		
Ácido (H+)	kg	1,3E-07
Cl-	kg	1,8E-07
DQO	kg	1,2E-08

(continua)

Tabela E.08- (continuação)

	Unid.	Eletricidade transmitida
		(/ MJ)
Efluentes líquidos		
Fenol	kg	2,3E-10
H2	kg	7,3E-09
Hidrocarbonetos	kg	9E-08
Íons metálicos	kg	2,4E-08
Óleo	kg	3,9E-08
Orgân. dissolvidos	kg	9E-08
Petróleo	kg	1,1E-07
Sódio	kg	8,8E-08
Subst. Dissolvidas	kg	4,5E-08
Subst. Suspensas	kg	3,1E-07
Resíduos sólidos		
Escória	kg	2,3E-09
Resíduo mineral	kg	2,6E-07
Resíduo não inerte	kg	6,7E-06
Aspectos não materiais		
Perda calor (ar)	MJ	0,0309
Perda calor (água)	MJ	0,159
Uso do solo	m2	4,8E-09

E.3 Transportes

Como exposto no item referente às estimativas do consumo e das emissões das máquinas de construção civil no Anexo D, os aspectos ambientais referentes às emissões veiculares foram obtidos com o auxílio de fatores de emissão.

No caso dos transportes, utilizou-se em alguns casos (transporte em caminhão, ônibus e trem) fatores de emissão diretamente obtidos da literatura, como será apresentado a seguir. Para o transporte marítimo, tanto de navios tanque (petroleiros) como de navios graneleiros, decidiu-se por simplicidade adotar modelos já prontos de bases de dados internacionais de ACV, como também será apresentado a seguir.

Cabe destacar que no caso dos fatores de emissão aqui utilizados, julgou-se mais adequado trabalhar com fatores europeus, oriundos de base britânicas (AEA, TECHNOLOGY, 2003; REINO UNIDO, 2003; NAEI, 2001; NAEI, 2003), em detrimento aos fatores americanos da EPA, seguindo a recomendação de especialistas da CETESB (LINKE, COSTA, 2003).

Como já justificado no Capítulo 3, os modelos de transporte apresentam os resultados na unidade de t.km, que representa os aspectos ambientais de uma

tonelada sendo transportada por um quilômetro. Para as bases de ACV este já é o valor padronizado, enquanto para os modelos criados com os fatores de emissão da literatura estes foram obtidos dividindo os valores dos fatores de emissão por quilômetro pela capacidade de carga dos veículos.

A única exceção à regra foi feita em relação ao ônibus de transporte dos operários, para o qual não é possível estabelecer uma carga em massa, e que teve suas emissões estimadas em função da distância percorrida.

E.3.1 Transporte rodoviário

Conforme dito anteriormente, o transporte de cargas por meio rodoviário será estimado como realizado em caminhão de 30t de capacidade.

Para a estimativa de consumo de combustível obteve-se um dado da base britânica (NAEI, 2001), para caminhões rígidos antigos, rodando em estradas, de 164 g combustível/ km rodado.

Para as emissões, não foi possível obter dados de veículos “antigos”, e utilizou-se dados de 1977, dados por uma outra base britânica (REINO UNIDO, 2003). Estes valores são apresentados na Tabela E.08, junto com o consumo acima indicado.

Tabela E.08- Fatores de consumo e emissões para caminhões 30t (REINO UNIDO, 2003).

Entradas		Saídas	
		Emissão (g/ km)	
Diesel	164 g/km	CO ₂ :	546,3
		CO:	1,80
		SO ₂ :	0,139
		NO _x :	6,69
		PM ₁₀ :	0,408
		Fuligem	1,970
		COV:	1,51
		N ₂ O:	0,030
		CH ₄ :	0,063
		1,3 Butadieno	0,0057
		Benzeno:	0,0302

Uma vez que os veículos possuem 30t de capacidade, calcularam-se os fatores a serem utilizados (em t.km), sendo estes apresentados na Tabela E.09.

Tabela E.09- Fatores de consumo e emissões para uso em transporte rodoviário.

Entradas		Saídas	
Diesel	5,467 g/t.km	Emissão (g/ t.km)	
		CO ₂ :	18,210
		CO:	0,060
		SO ₂ :	0,005
		NO _x :	0,223
		PM ₁₀ :	0,014
		Fuligem	0,066
		COV:	0,050
		N ₂ O:	0,001
		CH ₄ :	2,1E-3
		1,3 Butadieno	1,9E-4
		Benzeno:	6,9E-4

E.3.2 Transporte de ônibus

Conforme já apresentado no Anexo D, o transporte de operários foi estimado utilizando valores britânicos de fatores de consumo e de emissão de poluentes, sobre a distância percorrida, ao invés do modelo de t.km, uma vez que neste caso trata-se do transporte de operários, e não de cargas que possam ser estimadas em massa a ser transportada.

Desta forma, no Anexo D calculou-se a distância percorrida no transporte dos operários, e para estimar o consumo de diesel e as emissões atmosféricas, apresenta-se neste Anexo os valores dos fatores de emissão.

O consumo foi novamente obtido da base britânica (NAEI, 2001) para veículos antigos, agora rodando por estradas rurais, como sendo de 240 g de combustível por quilômetro rodado.

Quanto às emissões, utilizou-se novamente a base britânica para 1977 (REINO UNIDO, 2003). Os valores destas emissões e consumo, por quilômetro rodado, são apresentados na Tabela E.10.

Tabela E.10- Fatores de consumo e emissões para uso em transporte de ônibus . (REINO UNIDO, 2003).

Entradas		Saídas	
Diesel	240 g/km	Emissão (g/ km)	
		CO ₂ :	801,8
		CO:	3,89
		SO ₂ :	0,204
		NO _x :	8,96
		PM ₁₀ :	0,604
		Fuligem	2,892

(continua)

Tabela E.10- (continuação)

Entradas		Saídas	
		Emissão (g/ km)	
		COV:	1,41
		N ₂ O:	0,030
		CH ₄ :	0,063
		1,3 Butadieno	0,0072
		Benzeno:	0,0281

E.3.3 Transporte ferroviário

Para o transporte ferroviário, a primeira hipótese é de que todos os trens eram idênticos. Além disso, considerando que dos 30.223 km de linhas ferroviárias em operação atualmente no Brasil (contando com os trens metropolitanos), apenas 1.916 km são eletrificadas (BRASIL, 2003), será admitido que todas as locomotivas na época eram movidas a diesel.

Uma vez que o principal produto a ser transportado de trens neste estudo é o minério de ferro, tomou-se para uso neste trabalho a composição típica de um trem de transporte de ferro de uma grande empresa de logística mineral brasileira. Segundo a empresa (MBR, 2003), cada composição possui 132 vagões, de capacidade 97 toneladas de minério cada, movidos por duas locomotivas. Deste modo, tem-se por composição o transporte de 12.804 toneladas, ou cerca de 6.400 toneladas por locomotiva.

Para estimativa das emissões de cada locomotiva diesel, tomou-se os valores apresentados no Reino Unido (NAEI, 2003). Neste estudo apresentam-se valores em g/ km apenas para NO_x, PM₁₀ e CO₂, mas apresenta as emissões de diversos poluentes em t/ t combustível consumido. Considerando o consumo de diesel apresentado pela referência, de 6,14 g diesel/ km, para cada locomotiva, é possível fazer a mudança de unidades, obtendo os valores em g/km. A Tabela E.11 apresenta os valores originais e os convertidos.

Tabela E.11- Fatores de emissão para locomotivas (adaptado de NAEI, 2003)

Poluente	Emissão (t/ t combustível)	Emissão (g/ km)
CO ₂ :	857	5.261,98
CO:	4,88	29,96
SO ₂ :	2,64	16,21
NO _x :	18,2	111,75
PM ₁₀ :	0,81	4,97
Fuligem	0,75	4,60

(continua)

Tabela E.11- (continuação)

Poluente	Emissão (t/ t combustível)	Emissão (g/ km)
COV sem metano:	3,58	21,98
Metano	0,13	0,80
1,3 Butadieno:	0,31	1,90
Benzeno:	6,72E-3	4,13E-02
Chumbo	2,0E-4	1,23E-03
Mercúrio	1,0E-7	6,14E-07

De posse destes dados, e considerando que são usadas duas locomotivas num trem de 12.800 t de capacidade, obtém-se os dados em t.km dividindo as emissões acima, de uma locomotiva, por 6.400 t. Os resultados são apresentados na Tabela E.12.

Tabela E.12- Fatores de consumo e emissões para uso em transporte ferroviário.

Entradas		Saídas	
		Emissão (g/ t.km)	
Diesel	9,59E-4 g/t.km	CO ₂ :	8,22E-01
		CO:	4,68E-03
		SO ₂ :	2,53E-03
		NO _x :	1,75E-02
		PM ₁₀ :	7,77E-04
		Fuligem	7,20E-04
		COV s/ metano:	3,43E-03
		Metano	1,25E-04
		1,3 Butadieno:	2,97E-04
		Benzeno:	6,45E-06
		Chumbo	1,92E-07
		Mercúrio	9,59E-11

E.3.4 Transporte marítimo- Petroleiro

Como já dito no início deste Anexo, no capítulo referente à obtenção dos derivados de petróleo, para estimar o transporte da parcela importada de petróleo desde o Oriente Médio até o Brasil decidiu-se utilizar uma base internacional de ACV.

Desta forma, verificou-se que a base de dados mais adequada neste caso é a base IDEMAT 2001- *Tanker I*, desenvolvida pela Universidade de Delft e disponível no SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003). Esta, referente ao transporte de petróleo em navios de capacidade 88.750 t, bastante próximo de uma média para os navios da PETROBRAS, apresenta dados de consumo e emissão atmosférica por t.km, sendo que a única modificação realizada sobre a base de dados original foi a hipótese de que o combustível usado é o diesel normal, ao contrário do diesel marítimo.

A Tabela E.13 a seguir apresenta os valores quantificados para este processo, por t.km.

Tabela E.13- Fatores de consumo e emissões para uso em transporte marítimo em petroleiro (PRE CONSULTANTS, 2003).

Entradas			Saídas		
Bauxita	1,63E-07	Kg	Transporte	1,0	t.km
Petróleo	0,00947	Kg	Emissões atmosféricas		
Gás natural	2,25E-05	Kg	CO	8,12E-05	Kg
Energia inespecífica	0,00357	MJ	CO2	0,0271	kg
Água	3,88E-06	Kg	crude oil	1,47E-06	Kg
			HC	0,000047	Kg
			HC Alifático	2,83E-06	Kg
			Poeira	2,77E-07	Kg
			H2	3,72E-08	Kg
			H2S	1,44E-08	Kg
			HCl	4,09E-09	Kg
			Metano	3,59E-07	Kg
			Metil mercaptano	1,11E-10	Kg
			COV s/ metano	9,05E-06	Kg
			NOx	0,00051	Kg
			SO2	0,000429	Kg
			Fuligem	8,09E-07	Kg
			SOx	7,08E-08	Kg
			Efluentes líquidos		
			Cl-	2,31E-07	
			COD	1,24E-08	
			Petróleo	2,67E-08	
			H2	1,27E-08	
			Íons metálicos	2,04E-09	
			Na	1,54E-07	
			Óleo	6,74E-08	
			Fenol	4,09E-10	
			Resíduos sólidos		
			Resíduo mineral		
			Escória		
			Emissões não materiais		
			Uso do solo	8,42E-09	m ²

E.3.5 Transporte marítimo- Granel

Para o transporte de material a granel também decidiu-se utilizar uma base de dados internacional de ACV. Verificando as diversas alternativas, decidiu-se pelo uso da base *IDEMAT 2001- Bulk carrier I*, do mesmo banco de dados da base do petroleiro (PRE CONSULTANTS, 2003). Observando ambas as bases tem-se que os fatores são idênticos, tratando-se portanto de um mesmo navio, de iguais características operacionais e capacidade de carga, variando apenas quanto à constituição de sua carga- líquida ou granel.

Desta forma, para os fins de estimativa dos aspectos ambientais de consumo de combustível e emissões atmosféricas de transporte marítimo de produtos a granel, serão igualmente utilizados os fatores da Tabela E.13.

Consolidando os dados das Tabelas E.09, E.10, E.12 e E.13, juntamente com os dados da Tabela E.04 para o diesel, temos os resultados apresentados na Tabela E.14.

Tabela E.14- Inventário de ciclo de vida dos processos de transporte.

	Unid.	Transp. Caminhão (/ t.km)	Transp. Ferroviário (/ t.km)	Transp. Marítimo (/ t.km)	Transp. Ônibus (/ km)
Consumo de Recursos					
Água	kg	0,00018	3,2E-08	0,00026	7,9E-06
Argila	kg	2,1E-07	3,8E-11	3,1E-07	9,4E-09
Bauxita	kg	2,3E-06	4E-10	3,3E-06	9,9E-08
Calcita	kg	1,1E-06	1,9E-10	1,6E-06	4,7E-08
Energia (inespec.)	MJ	0,00244	4,3E-07	0,00357	0,00011
En. Carvão	MJ	5,4E-05	9,4E-09	7,8E-05	2,4E-06
En. Gás natural	MJ	0,0142	2,5E-06	0,0207	0,00062
En. hidrelétrica	MJ	5,4E-05	9,4E-09	7,8E-05	2,4E-06
En. Petróleo	MJ	0,00343	6E-07	0,005	0,00015
En. Urânio	MJ	5,4E-05	9,4E-09	7,8E-05	2,4E-06
Gás Natural	kg	1,5E-05	2,7E-09	2,3E-05	6,8E-07
Min. Ferro	kg	1,1E-06	1,9E-10	1,6E-06	4,7E-08
Petróleo	kg	0,00649	1,1E-06	0,00947	0,00029
Sal gema	kg	1,1E-06	1,9E-10	1,6E-06	4,7E-08
Emissões atmosféricas					
1,3 Butadieno	kg	1,9E-07	3E-07		7,2E-09
Benzeno	kg	3E-05	6,5E-09		2,8E-08
CH4	kg	2,4E-06	9,6E-14	3,6E-07	7,4E-08
Chumbo	kg		1,9E-10		
CO	kg	6,8E-05	4,7E-06	8,2E-05	4,2E-06
CO2	kg	0,0219	0,00082	0,0285	0,00096
COV	kg	0,00005			1,4E-06
COV-exceto CH4	kg	6,2E-06	3,4E-06	9,1E-06	2,7E-07
Fuligem	kg	6,6E-05	7,2E-07	8,1E-07	2,9E-06
H2	kg	2,6E-08	4,5E-12	3,7E-08	1,1E-09
H2S	kg	9,9E-09	1,7E-12	1,4E-08	4,3E-10
Hidrocarbonetos	kg	1,4E-05	2,4E-09	6E-05	6,1E-07
Hidrocarb. Alifát.	kg	1,9E-06	3,4E-10	2,8E-06	8,5E-08
HCl	kg	2,8E-09	4,9E-13	4,1E-09	1,2E-10
Metais pesados	kg	5,4E-09	9,4E-13	7,8E-09	2,4E-10
Metil- mercaptano	kg	7,6E-11	1,3E-07	1,1E-10	3,3E-12
N2O	kg	1E-06	1,3E-14		3E-08
NOx	kg	0,00028	1,8E-05	0,00053	1,2E-05
Petróleo	kg	1E-06	1,8E-10	1,5E-06	4,4E-08
Poeira	kg	1,4E-06	2,4E-10	2E-06	6E-08
PM10	kg	1,4E-05	7,8E-07		6E-07
SO2	kg	4,6E-05	2,5E-06	0,00043	2E-06

(continua)

Tabela E.14- (continuação)

	Unid.	Transp. Caminhão	Transp. Ferroviário	Transp. Marítimo	Transp. Ônibus
		(/ t.km)	(/ t.km)	(/ t.km)	(/ km)
Emissões atmosféricas					
SOx	kg	4,9E-06	8,5E-10	7,1E-06	2,1E-07
Efluentes líquidos					
Ác. Acético	kg	1,6E-07	2,8E-11	2,4E-07	7,1E-09
Cl-	kg	2,1E-07	3,7E-11	3,1E-07	9,3E-09
DQO	kg	1,4E-08	2,4E-12	2E-08	6,1E-10
Fenol	kg	2,8E-10	4,9E-14	4,1E-10	1,2E-11
H2	kg	8,7E-09	1,5E-12	1,3E-08	3,8E-10
Hidrocarbonetos	kg	1,1E-07	1,9E-11	1,6E-07	4,7E-09
Íons metálicos	kg	2,8E-08	4,9E-12	4,1E-08	1,2E-09
Óleo	kg	4,6E-08	8,1E-12	6,7E-08	2E-09
Orgân. dissolvidos	kg	1,1E-07	1,9E-11	1,6E-07	4,7E-09
Petróleo	kg	1,3E-07	2,2E-11	1,8E-07	5,5E-09
Sódio	kg	1,1E-07	1,9E-11	1,5E-07	4,7E-09
Subst. Dissolvidas	kg	5,4E-08	9,4E-12	7,8E-08	2,4E-09
Subst. Suspensas	kg	3,8E-07	6,6E-11	5,5E-07	1,7E-08
Resíduos sólidos					
Escória	kg	2,8E-09	4,9E-13	4,1E-09	1,2E-10
Resíduo mineral	kg	3,1E-07	5,4E-11	4,5E-07	1,4E-08
Resíduo não inerte	kg	8E-06	1,4E-09	1,2E-05	3,5E-07
Aspectos não materiais					
Uso do solo	m2	5,8E-09	1E-12	8,4E-09	2,5E-10

E.4 Cimento

Para a obtenção dos dados de obtenção do cimento, YOKOTE (2003) lançou mão de um inventário australiano (RMIT, 2003) para suas estimativas, realizando modificações nas fontes de energia e nas distâncias transportadas, principalmente.

De modo distinto ao caso de YOKOTE (2003), onde o consumo de concreto não se apresenta como prioritário, a obra de Itaipu consumiu uma quantidade de cimento considerada como muito significativa, sendo segundo a empresa (ITAIPU BINACIONAL, 2002) suficiente para construir 210 estádios do Maracanã. Este fato, aliado à indicação internacional já apontada no Capítulo 3, de relevância deste processo do ciclo de vida das usinas hidrelétricas, motivou a verificação da adequação dos dados de YOKOTE (2003) neste caso.

Como primeira medida necessária para validação dos dados, realizou-se um breve estudo sobre o processo genérico de obtenção do cimento Portland, que é resumido a seguir, com a finalidade de auxiliar na compreensão das análises realizadas.

E.4.1 Apresentação do processo de obtenção do cimento Portland

De modo muito simplificado podemos dizer que o cimento Portland é uma mistura de silicatos cálcicos, obtidos de fontes minerasi como argilas e rochas calcárias. Seu processo de fabricação, em linhas muito gerais, consiste na extração, britagem e moagem destas rochas, formando o chamado *blend* (ou *cru*), que em seguida é calcinado em fornos rotativos, dando origem ao que se denomina de *clínquer*. O clínquer por sua vez, após resfriado, é moído em moinhos de bolas junto com gesso, dando origem ao pó que se conhece por cimento (CETESB, 1992).

Este processo vale para os diversos tipos de cimento Portland, sendo que estes variam entre si pela incorporação de outros aditivos na moagem do clínquer, o que pode alterar substancialmente suas características. Estas diferenças não serão consideradas neste estudo, admitindo-se que todo o cimento Portland utilizado em Itaipu é isento de aditivos que não o gesso.

Outra variação importante é que existem basicamente duas formas de se fazer o *blend*, as vias seca e úmida. A diferença entre estas se encontra no teor de umidade na mistura das matérias-primas, que na via úmida é em torno de 32- 40% (pela adição de água no moinho), enquanto na via seca se restringe a valores em torno de 1% (BRASIL, 1974). Esta adição de água faz com que o *blend* seja denominado por *pasta*, na via úmida, e por *farinha seca*, na via seca.

Deve-se ressaltar que em geral os processos realizados em via úmida, tecnologia mais antiga e tradicional, têm a vantagem de terem menores emissões de particulado, e conseqüentemente menores perdas de material e emissões atmosféricas. No entanto, este processo possui um maior consumo energético, uma vez que na etapa de calcinação este excesso de água deve ser evaporado, o que segundo ANDRIOLO (1984) consome cerca de 2.260 kJ/ kg água adicionalmente. De fato, como apresentado por um estudo do IPT (1978), na época os fornos de clínquer consumiam em média no Brasil 1.610 kcal/ kg de clínquer quando por via úmida, e uma média de 880 kcal/ kg de clínquer quando por via seca (3.056 kJ/ kg clínquer

adicionalmente). Cabe ressaltar que, segundo o IPT (1978), à época o predomínio no Brasil já era da via seca, com uma participação de 62% contra 38% da via úmida, ao contrário da maioria dos países, como Inglaterra e EUA, com respectivamente 69% e 60% de sua produção por via úmida.

Cabe dizer ainda que de acordo com a CETESB (1992) o principal poluente emitido pelo processo de fabricação do cimento é o material particulado, seguido de outros poluentes gerados na queima dos combustíveis, como óxidos de nitrogênio e enxofre, monóxido de carbono, etc. Ademais, de acordo com BRASIL (1974), deve-se ter em mente uma emissão significativa de CO₂ no processo de calcinação, oriundo da conversão de carbonato de cálcio em óxido de cálcio.

E.4.2 Verificação da validade da base de dados de YOKOTE (2003) para o cimento usado em Itaipu

Uma vez que ainda não são disponíveis nem bases de dados específicas e nem dados completos sobre as diversas etapas do ciclo de vida do cimento Portland para o Brasil, decidiu-se verificar a validade da base de dados para cimento Portland utilizada por YOKOTE (2003), modificada da base australiana (RMIT, 2003). Cabe dizer que esta base foi escolhida pelo pesquisador devido ao baixo grau de agregação dos dados, permitindo assim a alteração de alguns parâmetros como o tipo de combustível utilizado e as distâncias pelas quais as matérias-primas são transportadas.

Como citado, devido à importância admitida ao cimento no caso de Itaipu, decidiu-se realizar uma avaliação cuidadosa da validade de uso desta base. A maior preocupação neste caso, baseadas em comentários de especialistas (JOHN, 2003), era sobre a porcentagem de cimento obtido pela via seca e úmida, uma vez que o Brasil possui desde muito uma matriz cimenteira distinta dos demais países.

Desta forma, procedeu-se ao exame dos relatórios originais do ICV australiano (RMIT, 2003), onde foram verificadas as fábricas de cimento inventariadas no estudo. Tomando uma relação destas plantas industriais, dividiu-se em cada fábrica a capacidade produtiva pelo número de fornos, obtendo uma “capacidade por tipo de forno”, em cada planta. Em seguida, somou-se para todas as plantas o total de capacidade instalada em fornos de via seca, semi- seca e úmida.

A Tabela E.15 a seguir apresenta as características das plantas e os resultados deste cálculo.

Tabela E.15 – Dados das plantas australianas de cimento, e estimativa de alocação da capacidade produtiva por tipo de forno (adaptado de RMIT, 2003).

Sigla	Empresa	Plantas	Capacidade dos fornos (t/ ano)	Quantidade de fornos			Capacidade por tipo de forno (t/ ano)		
				Seco	Úmido	Semi-seco	Seco	Úmido	Semi-seco
ABL	Adelaide Brighton Ltd.	1	225.000	0	1	1	0	112.500	112.500
		2	1.700.000	1	2	0	566.667	1.133.333	0
		3	220.000	0	3	0	0	220.000	0
		4	800.000	0	3	0	0	800.000	0
QCL	Queensland Cement Ltd	1	490.000	0	2	0	0	490.000	0
		2	580.000	0	0	1	0	0	580.000
		3	140.000	0	1	0	0	140.000	0
BCSC	Blue Circle Southern Cement Ltd.	1	1.400.000	1	1	0	700.000	700.000	0
		2	300.000	0	1	0	0	300.000	0
		3	650.000	1	0	0	650.000	0	0
ALC	Australian Cement Holdings Ltd.		450.000	2	0	0	450.000	0	0
CCL	Cockburn Cement Ltd.		680.000	0	4	0	0	480.000	0
GC	Goliath Portland Cement Company Ltd.		1.000.000	1	0	0	1.000.000	0	0
SOMA							3.366.667	4.375.833	692.500

De acordo com os dados da Tabela E.15, pode-se estimar que a base de dados australianas considera em seu modelo uma divisão de processos como 39,9% via seca, 51,9% via úmida e 8,2% via semi-seca. Estes dados apresentam-se bastante diferentes daqueles apresentados pelo IPT (1978) para o Brasil em 1976, de 62% via seca e 38% via úmida. Esta diferença mostra-se significativa quando observamos os valores de consumo energético para as duas rotas de fabricação, e constatamos que a via úmida consome quase o dobro de combustível que a via seca.

Outra diferença bastante significativa diz respeito ao tipo de rocha calcária utilizado em cada país. Segundo dados do relatório australiano (RMIT, 2003), neste país utiliza-se para obtenção do cimento uma rocha calcária com teor de 56% de CaO no minério.

Levantando-se nos registros oficiais da década de setenta, os dados das principais jazidas de calcário com baixos teores de MgO no Brasil, encontrou-se os seguintes valores para o teor de CaO (ABREU, 1973):

- São Joaquim, Itaipava/ RJ: 52,3%;
- Laranjais, Itaocara/ RJ: 53,6%;
- Itapeva/ SP: 50,7%;
- Matozinhos/ MG: 52,1%;
- Bambuí/ MG: 47,2%;
- Votuverava, Rio Bco Sul/ PR: 54,2%;
- Gramame, João Pessoa/ PB: 46,1%;
- Itaboraí/ RJ: 54,7%;
- Corumbá/ MT: 50,0%;
- Brasília/ DF: 54,4%;

Observando estes dados, pode-se inferir facilmente que os teores de óxido de cálcio nas rochas calcárias brasileiras é bastante diferente das australianas, o que leva a diferentes valores de consumo de rocha por tonelada de clínquer.

Uma vez constatadas estas diferenças, decidiu-se aprofundar as alterações realizadas por YOKOTE (2003) na base de dados, mas mantendo sua estrutura fundamental. Na verdade, admitiu-se a identificação de aspectos realizada como adequada, mas optou-se por levantar dados das quantificações com base em publicações nacionais da época de construção da usina de Itaipu, complementados por outros estudos posteriores quando não eram disponíveis dados deste período.

Cabe dizer no entanto que, embora se tenha buscado adequar para o Brasil da década de setenta a base de dados australianas, há que se considerar as condições de limitação deste trabalho. Assim, recomenda-se que os dados a seguir apresentados não sejam diretamente usados como uma base de dados brasileira de cimento, sendo necessário uma avaliação sobre sua adequação à cada situação específica.

E.4.3 Estimativa dos aspectos ambientais do processo de obtenção de cimento no Brasil em 1977

Seguindo a estrutura da base australianas (RMIT, 2003), temos que o ciclo de vida do cimento é dividido em três etapas básicas: obtenção da farinha crua, produção de

clínquer e fabricação do cimento. Para realizar as estimativas, seguiu-se esta divisão, promovendo o balanço entre as duas rotas de obtenção do blend, seca e úmida, distintas aqui apenas na adição de água e consumo energético, como será apresentado.

a. fabricação do cimento

Iniciando pelo processo de fabricação do cimento, temos originalmente na base australiana o processo dado pelo esquema apresentado no Figura E.03.

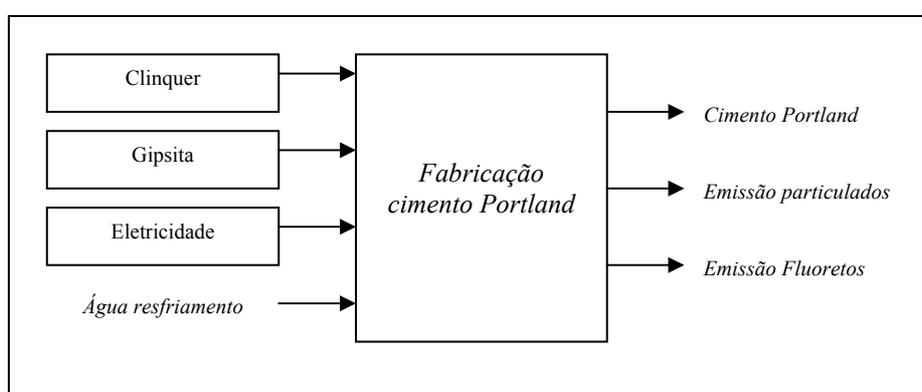


Figura E.03- Fabricação do cimento Portland (modificado de RMIT, 2003)

O primeiro valor relevante desta estimativa é a relação entre o clínquer e o cimento. Segundo dados da ABCP (1994), o cimento Portland comum possui um teor de 3% de gipsita em sua composição. Este valor está de acordo com outras referências, como ANDRIOLO (1985) que estabelece uma variação entre 3 e 5% e CARVALHO (2002), que estabelece um máximo de 5%.

Desta forma, temos os seguintes valores:

- consumo de gipsita: 0,03 kg/ kg cimento, e
- consumo de clínquer: 0,97 kg/ kg cimento.

Cabe dizer que a gipsita não terá os aspectos de sua extração contemplados, uma vez que esta ocorre de modo bastante primitivo, segundo PERES (2001). No entanto seu transporte será considerado, desde as lavras até as cimenteiras, em caminhão de 30 toneladas. Uma vez que segundo PERES (2001) cerca de 94% do gesso brasileiro provém do Nordeste do país (PI, CE, PE e RN principalmente), e as plantas fornecedoras de Itaipu encontram-se fundamentalmente no Sudeste do país (MG, SP,

PR, principalmente) será admitida uma distância de transporte média da gipsita de 3.000 km, distância aproximada entre Fortaleza e São Paulo (ABRIL, 1985).

Quanto ao consumo de eletricidade, segundo YAMAMOTO (1997) na década de 70 no Brasil o processo de produção do cimento como um todo consumia entre 120 e 130 kWh/ t cimento. Admitiremos a estimativa mais conservadora, de 130 kWh/ t cimento, ou 0,468 MJ/ kg cimento. Este valor apresenta-se condizente com outros apresentados por CARVALHO (2002) e, como veremos, condiz com as demais estimativas de consumo de energia do processo.

Para determinar a distribuição deste consumo elétrico, novamente recorreu-se a MARINGOLO (2001), *Apud* CARVALHO (2002), para quem este se divide da seguinte maneira:

- moagem de clínquer: 40%;
- moagem das matérias- primas: 25%;
- operação do forno e resfriadores: 20%;
- outros: 15%.

Os três processos nominalmente citados acima são na verdade, as operações de maior consumo energético de cada uma das três etapas nas quais divide-se o processo de produção do cimento Portland: a fabricação do cimento (operação de moagem do clínquer), produção do clínquer (operação dos fornos e resfriadores) e obtenção da farinha crua (operação de moagem das matérias- primas).

Estes dados no entanto deixam uma parcela significativa (15%) sem alocação, que consiste do consumo de outros processos destas três etapas. Desta forma, decidiu-se proceder a uma nova verificação.

No documento de CARVALHO (2002) tem-se uma tabela com dados de fabricantes de equipamentos, que atribui consumos a diferentes etapas do processo. Consolidando os valores para as três etapas consideradas, temos os seguintes percentuais:

- fabricação do cimento: 46,5%;
- produção do clínquer: 32,0 %
- obtenção da farinha crua: 21,5%.

Embora esta estimativa apresente para a obtenção da farinha crua um valor inferior ao anterior dado para a operação de moagem da matéria- prima, os demais valores

aparentam ser condizentes com a estimativa anterior, e desta forma decidiu-se utilizar estes percentuais na alocação do consumo elétrico do processo.

Utilizando estes valores para calcular a parcela da eletricidade da produção de cimento Portland que é consumida especificamente na etapa de fabricação do cimento, temos um consumo de 0,217 MJ de eletricidade/ kg cimento.

Quanto às emissões de particulado, temos na base australiana um valor bastante reduzido para a fabricação de cimento, de 7,56 mg/ kg cimento. Considerando as condições de equipamentos de controle de poluição da Austrália na atualidade como provavelmente mais restritivas que as brasileiras da época de construção de Itaipu, buscou-se levantar junta aos órgãos ambientais o valor estimado deste aspecto ambiental.

Neste sentido, CETESB (1992) apresenta diversos valores de fatores de emissão para as etapas do processo de fabricação do cimento. Estes valores são obtidos na literatura internacional, principalmente dos EUA e Canadá, para as operações sem sistemas de controle de poluição do ar. Ao final da publicação, CETESB (1992) recomenda valores de limites de emissão para as etapas após os sistemas de controle.

Uma vez que já na década de setenta as empresas cimenteiras brasileiras eram dotadas de sistemas de remoção de particulado de suas emissões, neste estudo serão utilizados os fatores de emissão de particulados considerando a existência de sistemas de controle, o que reduz de modo significativo estas emissões.

Especificamente para o caso da moagem do cimento não há na referência (CETESB, 1992) um valor orientativo específico, sendo que neste caso utilizou-se para a estimativas das emissões o valor dado para “outras etapas”, de 0,01 kg/ t material processado, ou seja, 10 mg particulado/ kg cimento moído. Na ausência de dados específicos para o processo desenvolvido na década de setenta, este valor será usado para esta estimativa.

Quanto à emissão de fluoretos não foi encontrada nenhuma referência, e nesta situação decidiu-se pela atitude mais conservadora, de manter o valor australiano de 0,12 mg fluoretos/ kg cimento (RMIT, 2003).

O mesmo ocorre com a água de resfriamento, consumo para o qual não foi possível encontrar nenhum valor na literatura referente ao Brasil. Manteve-se assim da mesma

forma que para os fluoretos o valor australiano, de 1,38 kg água resfriamento/ kg cimento (RMIT, 2003).

A Tabela E.16 apresenta estes dados, por quilo de cimento produzido.

Tabela E.16- Consumos e emissões da produção de cimento.

Entradas			Saídas		
C clínquer	0,97	Kg	Cimento	1,0	Kg
Gipsita	0,03	Kg	Emissões atmosféricas		
Água	1,38	Kg	Particulado	1,0E-5	Kg
Eletricidade	0,217	MJ	Fluoretos	1,2E-7	Kg

b. produção do clínquer

Já para a produção do clínquer, o processo deve ser diferenciado entre as duas rotas, de via seca e úmida. Para fins de consolidação posterior, admitiremos o dado do IPT (1978), de que em 1976 a produção de cimento brasileira era 62% por via seca e 38% por via úmida.

Uma observação importante é que embora a adição de água na via úmida seja realizada na mistura das matérias-primas, neste caso incluiremos o consumo de água na produção de clínquer, apenas para facilitar a modelagem do processo permitindo o uso comum pelos duas rotas de um mesmo processo de obtenção da farinha. Embora a produção da farinha tenha pequenas variações entre as duas rotas de alguns de seus consumos, principalmente energia elétrica, entende-se que estas diferenças não se mostram significativas para os fins deste trabalho.

Seguindo a estrutura da base australiana (RMIT, 2003), temos a produção do clínquer esquematizada como na Figura E.04.

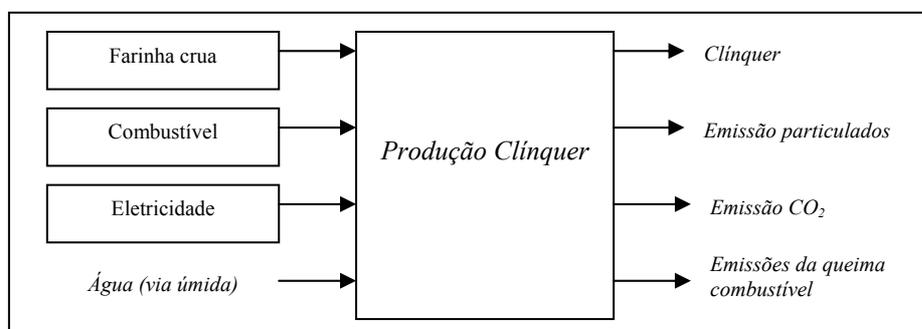


Figura E.04- Produção de clínquer (modificado de RMIT, 2003)

- *via seca*

A relação de consumo de farinha crua para obtenção de clínquer será estimada pelo valor dado pelo estudo do IPT (1978), que especificamente neste caso corresponde a um balanço de massa realizado em um forno de clínquer da época no Brasil. Neste cálculo admite-se ao forno de clínquer *via seca* uma massa de farinha crua com peso seco de 1,593 kg/ kg clínquer, adicionada de uma umidade remanescente de 0,011 kg/ kg clínquer. Desta forma, estimou-se o consumo de farinha como sendo de 1,604 kg de farinha crua/ kg clínquer.

Quanto ao consumo de combustível, cabe dizer que segundo diversos estudos encontrados (ABREU, 1973; BRASIL, 1974; IPT, 1978), na década de setenta os fornos de cimento no Brasil eram fundamentalmente alimentados por óleo combustível, que possui um poder calorífico de 9.575,75 kcal/ kg (YAMAMOTO, 1997).

Para fins desta estimativa admitiremos o consumo de óleo combustível, na produção de clínquer, pelo valor dado pelo IPT (1978) para a média de diversas usinas de cimento de MG e RJ no ano de 1977. Estes dados, que se encontram entre 833 e 1.010 kcal/ kg clínquer, tem como média o valor de 880 kcal/ kg clínquer, ou convertendo as unidades, 3,68 MJ óleo comb./ kg clínquer (92 g óleo combustível/ kg clínquer).

Devido à importância deste valor, foram feitas algumas verificações. Aplicando a taxa de 97% de clínquer no cimento, temos um valor de 3,57 MJ óleo comb./ kg cimento, que pode ser comparado com os valores de outras publicações, como: 3,37 a 3,88 MJ/ kg cimento (CARVALHO, 2002); 3,52 MJ/ kg cimento (YAMAMOTO, 1997); 3,45 MJ/ kg cimento (ANDRIOLO, 1985); 3,34 a 3,71 MJ/ kg cimento (BRASIL, 1974), tendo em mente que quanto mais recente o forno, mais eficiente a tecnologia, e portanto menor o consumo. Desta forma, verifica-se que o valor admitido é bastante pertinente.

De posse deste dado ainda é possível fazer outra verificação. Somando este valor ao consumo elétrico total estimado, temos uma total de 4,04 MJ energia/ kg cimento, o que nos dá uma participação de 11,6% de energia elétrica e 88,4% de combustível no forno, valores bastante próximos ao apresentado por CARVALHO (2002) e IPT (1978).

Especificamente para a etapa de produção do clínquer, o consumo elétrico corresponde a 32,0% do total, como já apresentado. Este valor representa 0,150 MJ/kg cimento ou, usando os valores indicados anteriormente, 0,154 MJ eletricidade/kg clínquer.

A produção de clínquer é a principal fonte de emissão de particulado de todo o processo. Para sua estimativa foi realizado o mesmo procedimento adotado para a etapa de fabricação de cimento, ou seja, tomou-se como valor orientativo das emissões dado por CETESB (1992) para sistemas com equipamentos de controle das emissões. No caso da produção de clínquer, são identificadas duas fontes de particulado: os fornos e os resfriadores, com valores de emissões respectivamente de 0,15 e 0,10 kg particulado/t de farinha alimentada. Somando as duas fontes e tendo em vista o consumo de farinha admitido nesta estimativa, tem-se a emissão de 401 mg particulado/kg clínquer.

Quanto às emissões de CO₂, estas são provenientes do processo de calcinação do carbonato de cálcio (CaCO₃) em óxido de cálcio (CaO), que libera o CO₂. Estas emissões variam segundo a composição da rocha utilizada, sendo os valores encontrados por CARVALHO (2002) para a produção de cimento no Brasil em torno de 800- 900 g/kg clínquer. Segundo YAMAMOTO (1997), no Brasil este valor está em torno de 870 g/kg clínquer, sendo um valor mais preciso, e que será utilizado nesta estimativa, dado pelo balanço de massa do IPT (1978), de 873 g CO₂ / kg clínquer.

No que diz respeito às emissões oriundas da queima do combustível (óxidos de nitrogênio e enxofre, além de monóxido de carbono), utilizou-se os valores dados para as emissões da queima dos combustíveis na base IDEMAT 2001, do SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003), apresentados na Tabela E.05 por quilograma de clínquer obtido pela via seca.

Consolidando os valores acima, tem-se o processo de obtenção do clínquer- via seca, quantificado como apresenta a Tabela E.17.

Tabela E.17- Consumos e emissões para a obtenção de clínquer por via seca.

Entradas			Saídas		
Farinha crua	1,604	Kg	Clinquer	1,0	Kg
Óleo combustível	0,092	Kg	Emissões atmosféricas		
Eletricidade	0,154	Kg	Particulado	4,01E-4	Kg
			CO ₂	0,873	Kg

- *via úmida*

Uma vez que a umidade da pasta não é incorporada ao clínquer, adotaremos a mesma taxa de consumo de farinha crua que na via seca, de 1,604 kg de farinha crua/ kg clínquer.

Para o consumo de água no processo via úmida, segundo CARVALHO (2002), temos uma umidade variando entre 30 e 35%. Os estudos do IPT (1978) apresentam balanços para três tecnologias de resfriadores em três plantas distintas: resfriador satélite, de grelha e satélite com precipitador eletrostático, com valores de umidade da pasta de respectivamente 33,6%, 34% e 31%. Na ausência de dados precisos, usaremos a estimativa mais conservadora, de 34% de umidade na pasta, que está de acordo com a faixa apresentada por CARVALHO (2002). Aplicando este valor, temos um consumo de 0,845 kg água/ kg clínquer.

Do mesmo modo que para via seca será adotado o consumo de óleo combustível dado pelo IPT (1978), da média de plantas de MG e RJ para 1977. Para a via úmida, estes valores oscilam entre 1.400 e 1.910 kcal/ kg clínquer, tendo como média 1.610 kcal/ kg clínquer, ou convertendo as unidades, 6,74 MJ óleo comb./ kg clínquer (168 g óleo comb./ kg clínquer).

A quantidade de energia elétrica consumida na via úmida provavelmente é um pouco superior a consumida no processo por via seca, mas por ausência de dados será considerado o mesmo, de 0,154 MJ eletricidade/ kg clínquer.

Embora a emissão de particulados seja menor no processo via úmida, a CETESB não apresenta valores distintos para as duas rotas (POLI, 2003). Desta forma, adota-se o mesmo fator, de emissão de 410 mg de particulado/ kg clínquer. A emissão de CO₂ também será a mesma, de 873 g de CO₂/ kg clínquer, e as emissões da queima de combustível serão, como no caso da via seca, estimadas pelo uso dos dados da Tabela E.05.

A Tabela E.18 apresenta estes valores por quilo de clínquer obtido pela via úmida.

Tabela E.18- Consumos e emissões da obtenção de clínquer pela via úmida.

Entradas			Saídas		
Farinha crua	1,604	Kg	Clinker	1,0	Kg
Óleo combustível	0,168	Kg	Emissões atmosféricas		
Eletricidade	0,154	Kg	Particulado	4,01E-4	Kg
Água	0,845	kg	CO ₂	0,873	Kg

c. obtenção da farinha crua

De acordo com dados oficiais (BRASIL, 1974), a farinha crua é obtida a partir da extração, britagem, moagem e mistura de matérias primas minerais contendo óxido de cálcio (obtido de rocha calcária), sílica (obtido de areia ou argila) e óxidos de ferro e alumínio, obtidos de argilas.

Na base de dados da Austrália, entram na composição da farinha crua calcita com 56% de CaO, areia com 99,98% de SiO₂, argila comum e xistosa, minério de ferro e bauxita (RMIT, 2003). No caso do Brasil, não foi encontrado em nenhuma referência consultada o uso de argila xistosa, e nem de areia. O minério de ferro e a bauxita, que segundo CARVALHO (2002) são adicionados para corrigir os teores de Fe₂O₃ e Al₂O₃ das argilas, são adicionados em quantidades muito reduzidas, de acordo com ANDRIOLO (1985). De fato, se tomarmos o exemplo da base australiana, e desconsiderando a massa de água adicionada à farinha para obtenção da pasta, estes dois minérios juntos não chegam a somar 2% da contribuição em massa à farinha. Desta forma, e na ausência de dados confiáveis para as quantidades adicionadas de minério de ferro e bauxita na farinha crua no Brasil, será admitido que esta é obtida apenas a partir de argila e calcário.

Com esta hipótese, podemos sumarizar a obtenção da farinha crua como apresentado na Figura E.05.

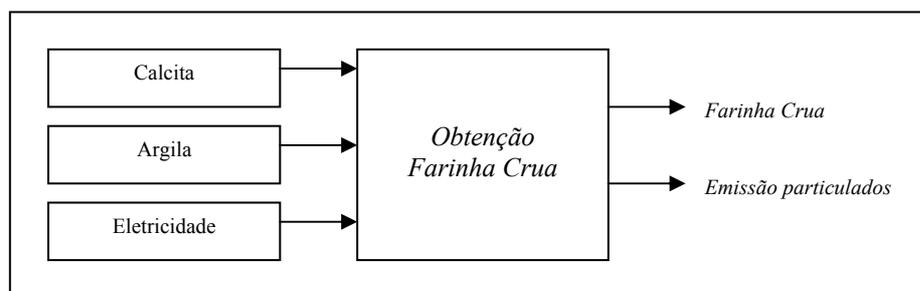


Figura E.05- Obtenção da farinha crua.

Uma proporção média destes componentes da farinha é dada por YAMAMOTO (1997), como 1,25 kg rocha calcária/ kg clínquer, e 0,25 kg argila/ kg clínquer. Transformando estes valores para o indicador por quantidade de farinha produzida, temos 0,762 kg rocha calcária/ kg farinha crua, e 0,152 kg argila/ kg de farinha crua, sendo o restante advindo de outros componentes não especificados (0,086 kg/ kg clínquer). Estes valores no entanto, além de serem aproximados, refletem condições genéricas, internacionais, não representando necessariamente as condições dos minerais brasileiros.

De modo a buscar dados adequados aos recursos minerais brasileiros, utilizaremos nesta estimativa dados oficiais, de BRASIL (1974), que apresenta uma média de 0,30 kg argila/ kg cimento e 1,40 kg rocha calcária/ kg cimento. Transformando estes dados para as unidades convenientes, temos os seguintes valores:

- consumo de rocha calcária: 0,900 kg/ kg farinha crua, e
- consumo de argila 0,193 kg/ kg farinha crua.

O valor de consumo da rocha calcária neste caso é maior do que o assumido para a Austrália, o que faz sentido se tivermos em conta que a rocha calcária considerada neste estudo tem menores teores de CaO que a rocha admitida no estudo australiano.

Para podermos estimar as distâncias transportadas da rocha calcária, primeiro é necessário que se localizem as jazidas deste recurso no Brasil. Embora este seja um recurso bastante abundante, deve-se ter o cuidado de considerar que para uso em cimento a rocha calcária deve possuir um teor máximo de óxido de magnésio (MgO) de 3% (BRASIL, 2003), sob risco de prejudicar as propriedades do cimento obtido. Assim, deve-se evitar os calcários dolomíticos, de alto teor de MgO, e dar preferência aos calcíticos.

Embora segundo ABREU (1973) as maiores jazidas de rocha calcítica se encontrem no Nordeste do país, segundo dados oficiais (BRASIL, 2003) há jazidas distribuídas por praticamente todos os estados Brasileiros, com grandes extrações ocorrendo em Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo e São Paulo, além de estados do Nordeste. Ademais, a referência ainda cita que 47,9% das jazidas pertencem aos cinco principais grupos cimenteiros do país, o que inclusive determina a localização de muitas plantas cimenteiras.

Desta forma, de modo simplificado e para os fins deste estudo, será admitido que as distâncias pelas quais a rocha calcária é transportada não seja muito grande, sendo estabelecido um valor arbitrário de 100 km de transporte da rocha calcária, em média. Este valor, ressalta-se foi estabelecido sem fundamentação numérica, devendo ser verificado e corrigido em estudos futuros que pretendam estabelecer um ICV mais preciso para o cimento.

Quanto à origem das argilas para uso em cimento, segundo dados de BRASIL (1974), as jazidas são facilmente encontradas em todo território nacional. Desta maneira, admitiremos que estas são obtidas das redondezas das plantas, e assim para fins desta estimativa será adotada uma distância de 50 km de transporte da argila. Novamente cabe a recomendação de que este dado seja revisto futuramente, em estudos de refino deste processo.

Ainda sobre os transportes, será considerado nesta estimativa que tanto a argila como a rocha calcária são transportados em caminhões de 30 toneladas.

Sobre o uso de eletricidade na obtenção da farinha crua, conforme já explanado, será admitido um percentual de 21,5% do total de energia elétrica, o que corresponde a 0,101 MJ/ kg cimento, ou convertendo as unidades, 0,065 MJ de eletricidade/ kg farinha crua.

Quanto à emissão de particulado, será adotado o valor recomendado pela CETESB (1992), de 0,01 kg/ t material processado. Considerando a soma da quantidade de argila e calcário, tem-se uma emissão de 10,9 mg de particulado/ kg farinha seca.

A Tabela E.19 apresenta os consumos e emissões da obtenção de um quilo de farinha crua, segundo estas estimativas.

Tabela E.19- Consumos e emissões da obtenção de farinha crua.

Entradas			Saídas		
Argila	0,193	Kg	Farinha crua	1,0	Kg
Calcário	0,900	Kg	Emissões atmosféricas		
Eletricidade	0,065	MJ	Particulado	1,09E-5	Kg

De modo a permitir que os fluxos de matéria e energia sejam seguidos até o meio natural, criou-se dois processos que realizam a estimativa da obtenção da calcita e da gipsita. Estes na verdade foram obtidos da base de YOKOTE (2003), que modificou a base australiana (RMIT, 2003) alterando o consumo energético.

d. obtenção da calcita

Para a obtenção da calcita, foram utilizados os mesmos valores de YOKOTE (2003), que se baseou em dados da Austrália (RMIT, 2003). Nestes, são estimados apenas o consumo de rocha calcária (*limestone*), o consumo elétrico de sua britagem, o consumo de óleos de sua queima, e a geração de particulados e resíduos sólidos do processo. Cabe dizer que os dados de emissão da queima de óleo já estão incorporados no processo “queima óleos”, com fatores dados pela Tabela E.05.

Desta forma temos, para cada quilo de calcita consumida os seguintes consumos e emissões:

- consumo de:
 - 1,1375 kg de calcita;
 - 0,025 MJ de óleo;
 - 0,018 MJ de eletricidade;
- emissões:
 - 0,025 kg poeira, e
 - 0,00014 kg de resíduos sólidos.

e. obtenção da gipsita

Do mesmo modo que para a calcita, utilizou-se como estimativa da obtenção da gipsita os valores de YOKOTE (2003), que são uma modificação da base australiana (RMIT, 2003). Adicionalmente foram introduzidas as emissões dadas pela AP-42, da EPA (ESTADOS UNIDOS, 1985b).

Desta forma temos, para cada quilo de gipsita, os seguintes valores:

- consumo de:
 - 1,0 kg de rocha (*gypsum*), e
 - 0,67 MJ de eletricidade.
- emissão de:
 - 47 g de particulado (PM10), e
 - 67 g de CO₂.

Incluindo estes processos e os transportes intermediários, tem-se o que se pode considerar como o inventário de ciclo de vida do cimento, desde a extração de suas

matérias-primas até a oferta do produto. Os valores deste inventário são apresentados na Tabela E.20 a seguir.

Tabela E.20- Inventário de ciclo de vida do cimento Portland.

	Unid.	Produção cimento
		(/ kg cimento)
Consumo de Recursos		
Água	kg	14,1
Argila	kg	0,3
Bauxita	kg	4,72E-05
Calcita	kg	1,59
Carvão	kg	0,000409
Energia (inespec.)	MJ	0,0512
En. Carvão	MJ	0,00112
En. Gás natural	MJ	0,297
En. hidrelétrica	MJ	0,493
En. Petróleo	MJ	0,0718
En. Urânio	MJ	0,00112
Gás Natural	kg	0,000322
Gipsita	kg	0,03
Min. Ferro	kg	2,24E-05
Petróleo	kg	0,136
Sal gema	kg	2,24E-05
Emissões atmosféricas		
1,3 Butadieno	kg	4,66E-08
Benzeno	kg	7,4E-06
CH4	kg	5,67E-06
CO	kg	0,000186
CO2	kg	0,942
COV	kg	1,23E-05
COV-exceto CH4	kg	0,00013
Fluoreto	kg	1,2E-07
Fuligem	kg	2,22E-05
H2	kg	5,33E-07
H2S	kg	2,07E-07
Hidrocarbonetos	kg	0,000294
Hidrocarb.Aromát.	kg	4,05E-05
HCl	kg	5,86E-08
Metais pesados	kg	1,12E-07
Metil- mercaptano	kg	1,59E-09
N2O	kg	2,45E-07
NO2	kg	2,23E-05
NOx	kg	0,00131
Particul. (inesp.)	kg	0,000416
Petróleo	kg	2,12E-05

(continua)

Tabela E.20- (continuação)

	Unid.	Produção cimento (/ kg cimento)
Emissões atmosféricas		
Poeira	kg	0,035
PM10	kg	0,00141
SO2	kg	0,00085
SOx	kg	0,000159
Efluentes líquidos		
Ácido (H+)	kg	3,37E-06
Cl-	kg	4,43E-06
DQO	kg	2,9E-07
Fenol	kg	5,86E-09
H2	kg	1,82E-07
Hidrocarbonetos	kg	2,24E-06
Íons metálicos	kg	5,9E-07
Óleo	kg	9,67E-07
Orgân. dissolvidos	kg	2,24E-06
Petróleo	kg	2,63E-06
Sódio	kg	2,22E-06
Subst. Dissolvidas	kg	1,12E-06
Subst. Suspensas	kg	7,85E-06
Resíduos sólidos		
Escória	kg	5,86E-08
Resíduo mineral	kg	6,45E-06
Resíduo não inerte	kg	0,000168
Resíduo sólido	kg	0,000196
Aspectos não materiais		
Perda calor (ar)	MJ	0,0159
Perda calor (água)	MJ	0,0816
Uso do solo	m2	1,21E-07

E.5 Aço

Do mesmo modo que no caso do ciclo de vida do cimento, devido à importância atribuída ao ciclo de vida do aço no estudo da Vattenfall (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002a, 2002b), julgou-se relevante uma avaliação mais cuidadosa dos dados utilizados para este insumo no ciclo de vida de Itaipu. Desta forma, procedeu-se a uma avaliação dos dados de YOKOTE (2003), assim como realizado para o cimento, verificando sua validade para o Brasil, e mais especificamente, para as condições da siderurgia brasileira de 1977.

Novamente de modo semelhante ao caso do cimento, procedeu-se a um estudo do processo produtivo do aço, que é resumido a seguir de modo a uniformizar conhecimentos para o levantamento de dados.

E.5.1 Apresentação do processo de obtenção do aço

Segundo CARDOSO (1988a), o aço pode ser definido como uma liga metálica constituída basicamente de ferro, com adições de pequenas quantidades de carbono e eventualmente outros metais. Ainda de acordo com o autor, em linhas gerais a fabricação do aço consiste no aproveitamento do metal existente no minério de ferro, pela eliminação progressiva das impurezas e adição de carbono.

O processo de produção do aço, conhecido como siderurgia, pode ser resumido em quatro etapas (CARDOSO, 1988a):

- preparo das matérias- primas;
- produção do ferro gusa (produto intermediário do refino do ferro);
- produção de aço, e
- conformação mecânica.

A seguir as quatro etapas apresentadas acima são genericamente descritas.

a. preparo das matérias- primas

- *preparo do minério de ferro*

O minério de ferro deve ser adequadamente preparado para sua redução, o que se faz pela adequação de sua composição e granulometria. Para tanto, o minério é moído e sujeito a um separador magnético, que retira a parte mais grossa das impurezas, chamada de *ganga*. O material fino resultante desta separação (*sinter feed* ou *pellet feed*) é posteriormente aglomerado, operação para a qual existem dois sistemas: a sinterização e a pelotização (CARDOSO, 1988a).

A sinterização visa produzir um briquete aglomerado a quente, chamado *sinter*. O processo consiste em dosar e misturar quantidades cuidadosamente calculadas de *sinter feed* com combustível sólido (carvão vegetal ou coque de carvão mineral) e calcário, sempre na forma de finos. Misturados, estes materiais são aplicados sobre uma grelha, aquecida a temperaturas da ordem de 1.200 a 1.500°C, promovendo a

aglomeração dos finos. Por último este material é resfriado, britado e classificado (LICCO, 1977).

Já o processo de pelletização busca a produção de pelotas de material ferroso, e é realizado em geral próximo às minas de ferro para facilitar o transporte do material. De modo simplificado, o *pellet feed* é moído em via úmida, com um teor de cerca de 80% de umidade. Após a moagem grande parte da água é removida, adicionado-se em seguida cal e bentonita, que agem como aglutinadores. Posteriormente esta pasta é enviada a uma etapa de rolamento sobre discos, produzindo as pelotas cruas, de formato esferóide. Estas pelotas são então cozidas em forno rotativo, peneiradas e classificadas (LICCO, 1977).

- *preparo do carvão*

Segundo CARDOSO (1988a), os combustíveis usados no alto-forno devem tanto fornecer calor para o processo de fusão como proporcionar a redução química dos materiais, e ainda garantir condições de granulometria que assegurem a entrada de ar. Desta forma dá-se preferência a combustíveis sólidos, mais especificamente ao carvão, mineral ou vegetal.

O carvão vegetal, obtido a partir da lenha, não necessita de processamento para utilização, uma vez que possui altos teores de carbono e teores muito baixos de outras substâncias e elementos. Já o carvão mineral possui uma série de substâncias indesejáveis, como cinzas inertes e elementos voláteis, que são retirados por meio do processo de preparo do carvão denominado *coqueificação* (CARDOSO, 1988a).

O processo de coqueificação tem como produto o denominado *coque*, obtido a partir do carvão mineral por meio de sucessivos aquecimentos do mineral em atmosfera controlada com baixo teor de oxigênio. Este processo é classificado como uma *destilação destrutiva* do carvão, que elimina os produtos indesejáveis na forma de gases e de um resíduo de baixa volatilidade, ambos recuperados. Ao sair da coqueria, o coque é resfriado (ou apagado) e beneficiado (LICCO, 1977).

b. produção do ferro gusa

O ferro gusa é um produto intermediário da produção do aço, resultado de uma primeira etapa de retirada de impurezas do mineral realizada em geral em um equipamento denominado *alto forno*.

Conforme coloca LICCO (1977), os alto-fornos são grandes reatores químicos, onde ocorre a redução do minério de ferro pela retirada do oxigênio de seus óxidos. São genericamente constituídos de uma câmara vertical refratária, alimentada pelo minério, por coque ou carvão vegetal, e por fundentes. Estes materiais reagem em seu interior com grandes quantidades de ar quente, dando origem ao gusa, ao gás de alto-forno e à escória, sendo esta última um resíduo formado pela combinação da ganga remanescente com os fundentes (CARDOSO, 1988a).

c. produção de aço

O processo de fabricação do aço se dá pelo refino do gusa, que consiste de modo genérico na redução do teor de carbono pela incorporação de oxigênio. Ademais, ocorre a retirada das impurezas remanescentes e a adição de outros eventuais elementos de liga (CARDOSO, 1988a).

Deve-se ressaltar que no processo de refino muitas vezes são adicionados, além do gusa, outras fontes de ferro, como as sucatas (da própria siderúrgica ou do pós uso de produtos com aço e ferro) e o chamado ferro esponja. (LICCO, 1977).

Os diferentes processos de obtenção do aço são designado pelo tipo de forno utilizado, sendo que os processos mais utilizados são (IBS, 1983):

- conversos a oxigênio (ou Linz- Donawit- LD);
 - forno elétrico, e
 - forno revérbero (ou Siemens- Martin- SM).
-
- *forno revérbero*

Também conhecido como forno Siemens- Martin (SM), este processo caracteriza-se pela sua grande flexibilidade quanto à matéria- prima utilizada. Desta forma, os fornos podem ser alimentados por gusa, sucata ou ferro esponja. No entanto seu alto consumo de energia e sua baixa produtividade fizeram com que historicamente fossem deixados de lado em função de outros tipos de forno (CARDOSO, 1988a).

O processo se dá adicionando fundentes, minério de ferro e manganês, e eventualmente sucata de aço, na soleira do forno já com os maçaricos operando. Em seguida adiciona-se o gusa, enquanto se aumenta a temperatura. Conforme o fundente se decompõe, ocorre o desprendimento de CO₂, que agita o banho e facilita a formação da escória (LICCO, 1977).

- *conversor a oxigênio*

Conhecido pelo nome de processo Linz-Donawitz (LD), utiliza a injeção direta de oxigênio para a oxidação do carbono, fósforo, manganês e silício presentes no gusa. Durante o borbulhamento ocorrem reações que transformam o gusa em aço e desprendem gases e material particulado, além de reduzidas quantidades de fluoretos. Cabe dizer que o combustível deste processo é o próprio carbono do gusa (LICCO, 1977).

- *forno elétrico*

Segundo CARDOSO (1988a) a vantagem do forno elétrico é que a geração de calor independe das reações no interior do forno, podendo assim este utilizar matérias-primas sólidas. Desta forma, é basicamente utilizado em aciarias que usam predominantemente sucata, não havendo nesse caso necessidade de oxidar as impurezas do gusa.

O tipo de forno elétrico mais comum, segundo BRADASCHIA (1974), é o de arco. Neste tipo de forno existem eletrodos que estabelecem um arco voltaico que funde o material sólido carregado no forno, que se liqüefaz (LICCO, 1977).

Independentemente do tipo de forno usado, na saída dos fornos de refino procede-se ao lingotamento do aço líquido. Este consiste na solidificação do aço em lingotes, que permitam a posterior conformação mecânica. Este processo pode ser convencional, descontínuo, ou contínuo (CARDOSO, 1988a).

d. conformação mecânica

Após lingotado, o aço precisa passar por diversas etapas de produção para que seja transformado em produtos acabados e semi-acabados, como chapas grossas e finas,

barras, perfis, arames, etc (CARDOSO, 1988a). Para os fins deste trabalho resumiremos estas operações à laminação a quente e suas operações relacionadas.

O processo de laminação consiste basicamente na deformação dos lingotes obtidos, de modo a obter um produto de seção transversal reta, homogênea e definida, por meio da aplicação de pressões entre cilindros giratórios que conferem o perfil desejado às peças (CARDOSO, 1988a). Em seguida à laminação podem haver outras etapas, de tratamento superficial e acabamento, mas que não serão consideradas nesta estimativa (LICCO, 1977).

Segundo a ABM- Associação Brasileira de Metais (ABM, 1962), antes da laminação o lingote precisa ser aquecido, o que é feito em fornos específicos sendo o mais comum o denominado forno-poço, para uniformização de sua temperatura ao longo de sua seção transversal.

Uma vez aquecido o lingote passa pelo laminador desbastador, que consiste de dois cilindros que movimentam a peça em movimentos alternados proporcionando ao material a seção transversal uniforme, quadrada (bloco) ou retangular (placa). Para obter-se os produtos acabados ou semi-acabados, procede-se então a uma série de laminações a quente, modificando estas seções transversais até a obtenção da forma desejada. No caso de chapas finas (menores que 2mm de espessura) e arames de menos de 5mm de diâmetro, as últimas operações são realizadas à frio.

E.5.2 Verificação da validade da base de dados de YOKOTE (2003) para a indústria siderúrgica brasileira em 1977

Como já exposto, procedeu-se no caso do aço a uma verificação da validade do uso das bases de dados de YOKOTE (2003) para as siderúrgicas brasileiras em operação no ano de 1977, devido à importância que os aspectos ambientais do ciclo de vida do aço parecem ter no ciclo de vida das hidrelétricas, como apontado pelo estudo da VATTENFALL (SWEDISH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT COUNCIL, 2002a, 2002b).

O ciclo de vida do aço no estudo de YOKOTE (2003) foi baseado nos dados australianos (RMIT, 2003), modificando do mesmo modo que no cimento as fontes energéticas e as distâncias e modos de transportes. Desta forma, decidiu-se avaliar os relatórios deste inventário para verificação da sua representatividade neste estudo.

A primeira verificação realizada foi a respeito dos processos utilizados na siderurgia reportada nos dados australianos (RMIT, 2003). Sobre os tipos considerados de forno para refino do ferro, temos incluídos no estudo australiano os dados apresentados na Tabela E.21.

Tabela E.21- Tipos de forno e cálculo da alocação por processo de refino no estudo de RMIT (2003).

Planta	Tipo de forno	Capacidade (milhões t)	% da produção considerada
BHP- Pt Kembla	LD	4,80	85,9
BHP- Newcastle	LD	1,75	
BHP- Whyalla	LD	1,20	
Smorgon- Melbourne	Elétrico	0,60	14,1
BHP- Sydney	Elétrico	0,42	
Comsteel- Newcastle	Elétrico	0,25	
TOTAL		9,02	100,0

De modo a comparar estes dados com a realidade brasileira de 1977, tomou-se os dados de participação de cada tipo de forno, publicados pelo IBS- Instituto Brasileiro de Siderurgia, para o ano de 1977 (IBS, 1983):

- fornos SM: 19,5%;
- fornos LD: 56,3%;
- fornos elétricos: 24,0%, e
- fornos Bressemer: 0,2%.

Como se pode perceber, estes dados diferem bastante devido principalmente ao fato de que quase um quinto da produção era obtido em fornos SM, que não fazem parte das estimativas australianas. Isso demonstra que, quanto à participação dos diferentes tipos de forno, os dados australianos não são representativos da realidade brasileira em 1977.

Um segundo aspecto bastante relevante que foi verificado é a existência no Brasil de uma parcela do gusa sendo produzido com carvão vegetal. Na verdade, na década de setenta esta rota de obtenção de gusa era ainda mais importante para o Brasil do que atualmente, sendo que de acordo com o IBS (1983), a produção de gusa em 1977 era realizada:

- 59,0% em altos fornos a coque;
- 39,0% em alto-fornos a carvão vegetal, e

- 2,0% em fornos elétricos de redução.

Neste estudo será desconsiderado o uso de fornos elétricos de redução direta. Aplicando os 2,0% às contribuições dos alto-fornos, obtém-se os seguintes percentuais:

- 60,0% em altos fornos a coque, e
- 40,0% em alto-fornos a carvão vegetal.

Desta maneira, pode-se concluir que a indústria siderúrgica brasileira na década de 70 era totalmente distinta do modelo australiano. Tanto pelo uso extenso de carvão vegetal como redutor, quanto pelos tipos de processos usados nas aciarias brasileiras, concluiu-se que as diferenças encontradas promovem profundas alterações nos consumos de material e energia, bem como nas emissões dos processos, sendo desta forma muito limitada a validade desta base no caso em questão.

Assim, decidiu-se não utilizar os dados internacionais nesta etapa, e desta forma levantou-se junto à bibliografia existente da época informações sobre as características e os aspectos ambientais dos processos siderúrgicos realizados no Brasil na época.

Este procedimento, como será notado ao longo deste capítulo, trouxe a vantagem de aproximar o modelo da realidade da época. No entanto, ressalta-se, deve-se ter muito cuidado em qualquer outra eventual aplicação destas estimativas, uma vez que estes dados são referentes aos processos típicos da indústria siderúrgica do Brasil em 1977, podendo ser muito distintos dos atuais.

E.5.3 Estimativas dos aspectos ambientais dos processos de obtenção do aço no Brasil em 1977

Neste trabalho temos dois tipos de consumo de aço: o aço estrutural, da armação do concreto, e o aço dos equipamentos temporários e permanentes da usina. Para fins de simplificação, como primeira hipótese será admitido que todo o aço utilizado era idêntico, isento de ligas, laminado a quente e proveniente de siderúrgicas brasileiras, modeladas por processos médios para o setor, no ano de 1977. Posteriores possibilidades de refino desta hipótese seriam identificar os fornecedores de aço, como foi realizado para o aço estrutural, e estabelecer seus respectivos ciclos de vida

individualizados por planta, tendo em conta os processos utilizados e as distâncias transportadas específicas.

A produção de aço laminado no Brasil em 1977 foi de 8.822.359 toneladas, sendo que apenas quatro usinas (USIMINAS, COSIPA, CSN e Belgo- Mineira) foram responsáveis por 48% da produção (IBS, 1983).

Cabe dizer que existem dois tipos de usinas siderúrgicas: as integradas e as semi-integradas. As primeiras são aquelas que executam todas as etapas do processo, e as semi-integradas, aquelas que apenas produzem gusa ou que produzem aço a partir do gusa, não possuindo assim todas as etapas do processo siderúrgico em suas instalações (CARDOSO, 1988b). Neste trabalho admitiremos que toda a produção brasileira em 1977 era proveniente de usinas integradas, uma vez que esta era a configuração predominante, existente nas principais usinas (IBS, 1983).

Quanto à distribuição geográfica da produção de aço, temos os seguintes dados para 1977 (IBS, 1983):

- Minas Gerais: 4.743.067 t (42,5%);
- São Paulo: 3.537.281 t (26,9%);
- Rio de Janeiro: 2.607.587 t (24,0%), e
- outros Estados: 803.812 t (7,2%).

Quanto aos processos utilizados, temos nas aciarias brasileiras em 1977 a seguinte distribuição por processo (IBS, 1983):

- fornos SM: 19,5%;
- fornos LD: 56,3%, e
- fornos elétricos: 24,0%.

Além dos tipos citados de fornos de aciaria, em 1977 0,2% da produção de aço era realizada em fornos do tipo Bressemer, que não serão incluídos nesta estimativa. Realocando este percentual igualmente entre os demais tipos, temos que da produção de aço bruto, tem-se a contribuição por processo de:

- 56,40% por fornos L-D;
- 24,05% em fornos elétricos, e
- 19,55% em fornos SM.

Já para produção de ferro gusa, se excluirmos os fornos elétricos de redução como já explicado, temos as seguintes contribuições (IBS, 1983):

- 60,0% em altos fornos a coque, e
- 40,0% em alto-fornos a carvão vegetal.

De posse destes dados, criou-se um modelo simplificado do ciclo de vida de aço, que é apresentado na Figura E.06.

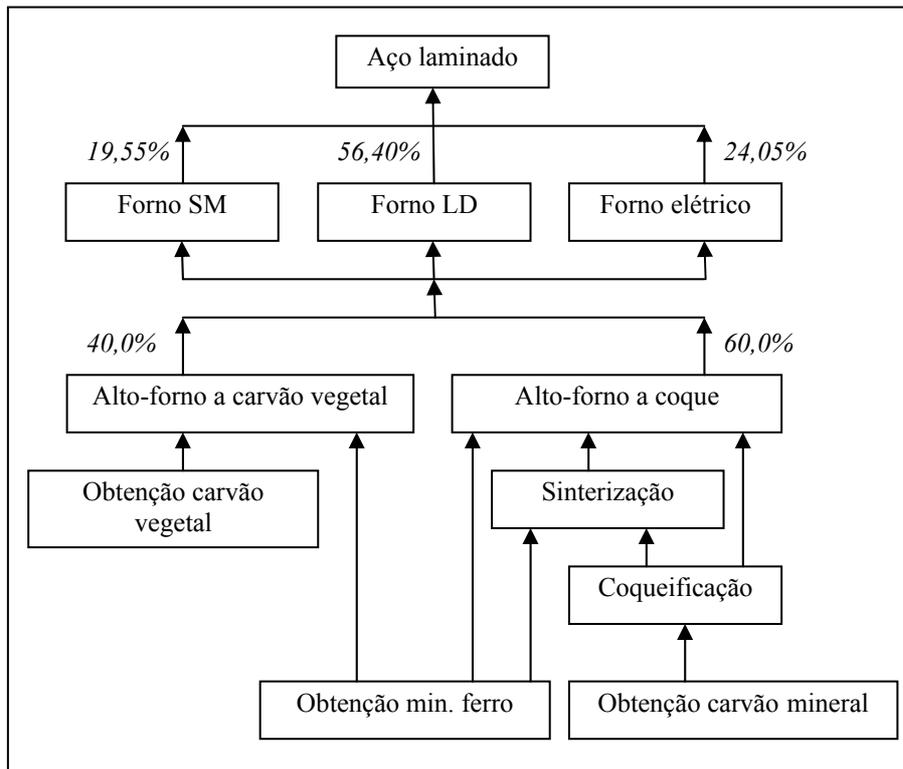


Figura E.06- Modelo de ciclo de vida do aço.

Antes de partir às estimativas, deve-se salientar que pelas pesquisas bibliográficas realizadas e em conversa com especialistas, nota-se que cada usina siderúrgica opera de modo distinto, e mesmo uma única usina pode alterar seu modo de funcionamento entre uma e outra carga, em função de variáveis tanto técnicas como de mercado dos insumos.

Assim, é importante que se coloque que as estimativas aqui realizadas são baseadas em dados genéricos, que tentam se aproximar das condições normais de operação das plantas à época, representando valores “clássicos” e que não necessariamente são sempre seguidos pelas empresas.

Outra simplificação utilizada é que nos dados apresentados neste texto são elencados diversos consumos de materiais em pequenas quantidades, que de modo a simplificar as estimativas na modelagem, foram submetidos a um critério de corte de massa, em

1% da massa total de consumos, à exceção da água e recursos energéticos. Desta forma, para apresentação nas tabelas de consolidação, e conseqüentemente nos processos modelados no SimaPro, só serão apresentados aqueles consumos materiais maiores que 10 kg/ t.

Por último, cabe dizer que a indústria siderúrgica, como será apresentado a seguir, gera diversos sub-produtos ao longo de seus processos. Nesta estimativa estes não serão contabilizados como resíduos ou consumos, aparecendo na modelagem para uso no ICV apenas como produtos gerados, sem alocação de carga ambiental.

A seguir apresentam-se as estimativas dos processos apresentados na Figura E.05.

a. aço laminado

Como dito anteriormente na descrição do processo, não importa qual seja o tipo de forno utilizado o aço é sempre lingotado ao final do processo. Uma vez que este processo não depende do tipo de forno, admitiremos a etapa de lingotamento como parte da laminação, aqui estimada.

De acordo com dados do próprio setor (IBS, 1983), no ano de 1977 o Brasil produziu 11.163.755 t de aço bruto, dos quais apenas 1.957.256 t foram lingotados de modo contínuo, o que representa apenas 17,5% do total. Deste modo, com vistas a simplificar as estimativas, assumiremos todo o lingotamento realizado de forma descontínua.

Segundo ARAÚJO (1967), o consumo de calor num forno-poço é de 360 a 470 kcal/ kg lingotes, dependendo da sua temperatura de entrada, sendo usado em geral óleo combustível. Admitiremos por conservadorismo, o valor de 470 kcal/ kg lingote, o que admitindo o poder calorífico de 10.400 kcal/ kg, resulta um consumo de 45,2 kg óleo combustível por tonelada de lingotes.

Já para o laminador desbastador, o autor apresenta um consumo médio de 25 kWh de eletricidade/ t aço laminado, enquanto que para a laminação de barras, perfis e placas o consumo varia entre 110 e 165 kWh/ t aço (ARAÚJO, 1997). Admitindo o valor mais conservador de 165 kWh/ t aço, tem-se um consumo elétrico de 190 kWh por tonelada de aço laminado.

Quanto à geração de resíduos sólidos, há que se considerar, segundo BRADASCHIA (1974), uma perda de cerca de 155 kg de aço por tonelada laminada, na forma de

sucata, que em geral retorna ao processo, e desta forma não será contabilizada como resíduo embora seja levada em conta no cálculo de eficiência do processo.

Na etapa de laminação o principal resíduo gerado, principalmente no desbaste, é a chamada *carepa*. A carepa é um óxido de ferro originado do ataque ao aço pelo oxigênio do ar ou da atmosfera dos fornos, e que é contaminada de outros materiais como óleos e graxas dos cilindros de laminação, e que em geral é removido por decapagem química (GELEILETE, 1998).

Desta forma, tem-se um resíduo de alto teor de ferro, mas contaminado, gerado em taxas de 5 a 40 kg/ t aço laminado. Nesta estimativa será considerado o valor mais conservativo, de 40 kg/ t aço. A presença destes óleos e graxas inviabiliza o uso na sinterização, e atualmente a maioria das empresas enviam a carepa da laminação para destinação final como resíduos Classe I (perigosos) (SOBRINHO, 2000).

No que diz respeito aos efluentes, segundo a FEEMA (1977), a laminação gera cerca de 37- 850 l de efluentes/ t aço, com a seguinte composição:

- sólidos suspensos: 1.000- 1.500 mg/l;
- sólidos dissolvidos: 400- 500 mg/l;
- óleos: 2- 40 mg/l, e
- sulfatos: 100- 150 mg/l.

Os efluentes da laminação são enviados a um tanque, de onde saem com cerca de 80- 100 mg/l de sólidos suspensos e 30- 80 mg/l de óleos (FEEMA, 1977).

Admitindo a vazão máxima indicada e usando os valores de concentração acima, temos ao final:

- sólidos suspensos: 0,085 kg/ t aço, e
- óleos e graxas: 0,068 kg/ t aço.

A Tabela E.22 apresenta os dados para a laminação de 1,0t de aço.

Tabela E.22- Consumos e emissões da laminação do aço.

Entradas			Saídas		
Aço lingotado	1.155,00	kg	Aço laminado	1.000,00	kg
Energia Elétrica	190,00	kWh	Sucata	155,00	kg
Óleo combustível	52,20	kg	Poluição das águas		
			Sól Suspensos	0,085	kg
			Óleos e graxas	0,068	kg
			Resíduos sólidos		
			Carepa	40,00	kg

b. forno LD

Embora de modo menos intenso do que na produção de gusa, como veremos adiante, a carga dos fornos de uma aciaria também varia, principalmente na divisão entre o aporte de gusa e de sucata. De modo a simplificar esta estimativa, tomaremos os valores médios para o setor fornecido por MASUDA (1980), para quem os consumos por tonelada de lingotes de aço produzido em fornos LD são:

- gusa líquido: 930 kg;
- sucata: 157 kg;
- cal: 60 kg;
- fluorita: 2 kg;
- ferro manganês: 7 kg;
- ferro silício: 5 kg;
- refratário: 5 kg;
- alumínio: 0,3 kg;
- eletricidade: 30 kWh, e
- oxigênio: 60 Nm³.

A geração de resíduos de escória numa aciaria LD depende muito da composição do gusa, do uso de sucata e dos reagentes utilizados, oscilando entre 70 e 170 kg por tonelada de aço produzido (GELEILETE, 1998). De acordo com SOBRINHO (2000) um valor médio usado atualmente por várias empresas é o de 120 kg/ t aço. Além disso, BRADASCHIA (1974) afirma que no forno LD são geradas 20,3 kg de sucata/ t aço.

As escórias de aciaria, segundo WRONA (1997), tem menos possibilidades de reciclagem do que as de alto-forno. Segundo o IBS (2002), atualmente 46,6% são usadas como base para estradas, 22,5% são utilizadas em aterros, lastro ferroviário e outros usos, e aproximadamente 30,9% são estocadas pelas empresas para que futuramente se encontre uma alternativa economicamente viável de utilização.

Mesmo com esta limitação de uso, para fins desta estimativa consideraremos as escórias de aciaria como sub-produtos do processo, não alocando a estas nenhuma carga ambiental.

No que diz respeito às emissões atmosféricas, a fusão e refino do gusa em fornos LD geram um gás, que após lavagem é lançado à atmosfera. A quantidade e composição deste gás, após lavagem, são apresentadas por JUVILLAR (1980) para uma corrida de 29.750 kg de aço. A seguir são apresentados estes valores, com o valor por tonelada de aço entre parênteses:

- quantidade total de gases: 3.689 (124,2) kg;
- composição:
 - CO: 2.174 (73,1) kg;
 - CO₂: 854 (28,7) kg;
 - SO₂: 2 (0,1) kg;
 - FeO: 266 (8,9) kg, e
 - cal: 393 (13,2) kg.

Conforme pode ser visto, nos fornos LD devido às altas temperaturas há evaporação de ferro em pequenas quantidades, que arrastado pelos gases se converte em óxidos. De acordo com a FEEMA (1977), há também a liberação de fluoretos, em cerca de 80 kg/ t aço quando não há sistemas de depuração. Considerando a existência de tratamento para estes gases, a FEEMA (1977) apresenta a variação destas emissões entre 0,9 e 13,0 g/ t aço, dependendo da tecnologia. Para os fins desta estimativa admitiu-se o valor mais elevado, de 13,0 g/ t aço.

Quanto ao particulado, uma aciaria LD gera em torno de 10 a 20 kg por tonelada de aço líquido, em base seca (GELEILETE, 1998). Segundo SOBRINHO (2000) um valor médio é 18 kg/ t aço.

Para estimativa dos efluentes, tem-se que cerca de 90% da água de um forno LD é utilizada na lavagem dos gases, e o restante em seu resfriamento. Um valor típico das águas residuais é de 284 litros/ t aço (HIGA, 1982). Admitindo a divisão acima, são 28,4 l/ t aço de efluente de resfriamento e 255,6 l/ t aço de efluente de lavagem dos gases.

Conforme CETESB (1978), os principais contaminantes das águas de lavagem dos gases de aciaria são, em média:

- óleos e graxas: 113 mg/l;
- ferro: 200 mg/l;
- fenol: 0,011 mg/l;

- cromo trivalente: 0,061 mg/l, e
- manganês: 4,69 mg/l.

Segundo BRAILE, CAVALCANTI (1999) este efluente ainda possui taxas e fluoretos em torno de 10,9 mg/l.

Já para as águas de resfriamento da aciaria, a composição é dada por (CETESB, 1978):

- óleos e graxas: 43 mg/l;
- ferro: 237,3 mg/l;
- fenol: 0,010 mg/l, e
- manganês: 1,66 mg/l.

A Tabela E.23 apresenta os valores consolidados para 1,0t de lingotes, já aplicado o critério de corte.

Tabela E.23- Consumos e emissões da produção de 1,0t de lingotes em fornos LD

Entradas			Saídas		
Gusa	930,00	kg	Lingotes aço	1.000,00	kg
Sucata	157,00	kg	Sucata aço	20,30	kg
Calcário	60,00	kg	Escória aciaria	120,00	kg
Eletricidade	30,00	kWh	Poluição atmosférica		
Oxigênio	60,00	Nm3	CO	73,10	kg
			CO ₂	28,70	kg
			SO ₂	0,10	kg
			FeO	8,90	kg
			CaO	13,20	kg
			Fluoreto	1,3E-2	kg
			Particulado	18,00	kg
			Poluição das águas		
			Óleos e graxas	30,1	g
			Ferro	57,8	g
			Fenol	0,003	g
			Cromo	0,016	g
			Manganês	1,25	g

c. forno SM

Devido à sua característica de flexibilidade quanto ao uso de diferentes matérias-primas, os fornos SM consistem na etapa do processo siderúrgico onde podem ocorrer as maiores variações de composição tanto da carga como do combustível utilizado. Para os fins desta estimativa, utilizou-se dados reais de uma planta

específica, tidos como adequados à realidade da década de setenta, que são apresentados BRADASCHIA (1974) para uma corrida de 1.230 kg de aço. Estes dados são apresentados a seguir, com o valor por tonelada de aço lingotado entre parênteses:

- gusa líquido: 784 (637,4) kg;
- sucata: 442 (359,3) kg;
- cal: 94,5 (76,8) kg;
- fluorita: 2,72 (2,2) kg;
- minério ferro: 148,5 (120,7) kg
- dolomita: 37,4 (30,4) kg;
- ferro manganês: 1,72 (1,4) kg;
- óleo combustível: 550 (447,2) kg;
- eletricidade: 10,8 (8,8) kWh, e
- gás coqueria: 210 (170,7) Nm³.

Como resíduo do processo, segundo BRADASCHIA (1974), são gerados 141,5 kg de escória por tonelada de aço. Do mesmo modo que a escória no caso dos fornos LD, neste caso estas não serão consideradas resíduos, e sim sub-produtos do processo, sem alocação de carga ambiental.

Do mesmo modo que os fornos LD, os fornos SM geram além do aço e da escória, gases de aciaria. Nesta caso, de acordo com HERKOVIC (1976), são gerados cerca de 32,2 kg de gases de aciaria por tonelada de aço.

Os gases exauridos possuem grandes quantidades de particulado, que são lavados e precipitados quimicamente (HIGA, 1982). De acordo com CETESB (1978), já na década de setenta os gases possuíam sistemas de limpeza, após os quais eram lançados à atmosfera. Estes sistemas eram instalados após os regeneradores.

Segundo a FEEMA (1977), um forno SM gera cerca de 2.100- 3.500 Nm³ de gás/ t aço, sendo os principais contaminantes após a limpeza:

- a) particulados: sem injeção de oxigênio, são 1 a 6 kg/ t aço, mas se há injeção de oxigênio este valor vai para 1 a 10 kg/ t aço. Após o tratamento estes valores oscilam entre 0,1 e 0,7 kg/ t aço. Para esta estimativa será adotado o valor 0,7 kg/ t aço;

- b) SO₂: emissão de 8g/ Nm³ num forno à gás, mas muito sensível ao combustível usados. Admitindo uma geração de 3.500 Nm³ gás/ t aço, temos 28,0 kg/ t aço;
- c) NO_x: emissão de cerca de 1,1 kg/ t aço, e
- d) fluoretos: varia muito em função do sistema de tratamento, como no caso dos fornos LD, de 0,9 a 13,0 g/ t aço. Admitiu-se aqui o maior valor, de 13,0 g/ t aço. De acordo com LICCO (1977), a emissão de fluoretos neste caso é de 0,05 kg/ t aço, e não ocorre emissão significativa de CO.

Quanto aos efluentes, os fornos SM utilizam grandes vazões de água para resfriamento (HIGA, 1982). No entanto estas são em grande parte recirculadas após o tratamento (FEEMA, 1977).

A única caracterização dos efluentes de aciarias SM após o sistema de tratamento é a apresentada por BRAILE, CAVALCANTI (1993), referente a uma usina específica, e que será usado por falta de uma estimativa mais adequada.

Segundo BRAILE, CAVALCANTI (1993), uma aciaria SM emite efluentes tratados com a presença dos seguintes contaminantes:

- sólidos suspensos: 0,0256 kg/ t aço;
- fluoretos: 0,032 kg/ t aço;
- nitrato: 0,149 kg/ t aço, e
- zinco: 0,559 kg/ t aço.

A Tabela E.24 apresenta os valores para a produção de 1,0t de lingotes, já aplicado o critério de corte.

Tabela E.24- Consumos e emissões da produção de 1,0t lingotes em fornos SM.

Entradas			Saídas		
Gusa líquido	637,40	kg	Lingotes de aço	1.000,00	kg
Sucata	359,35	kg	Escória de aciaria	141,50	kg
Cal	76,8	kg	Gás de aciaria	32,20	kg
Minério ferro	120,73	kg	Poluição atmosférica		
Dolomita	30,41	kg	Particulado	0,7	kg
Óleo combustível	447,15	kg	SO ₂	28,0	kg
Eletricidade	8,78	kWh	NO _x	1,1	kg
Gás coqueria	170,73	m ³	Fluoreto	1,3E-2	kg
			Efluentes líquidos		
			Sól. Suspensos	25,6	g
			Fluoretos	32,0	g
			Nitratos	149,0	g
			Zinco	559,0	g

d. forno elétrico

Embora tenham sido desenvolvidos para trabalhar com ligas especiais, os fornos elétricos acabaram por ocupar um lugar de destaque na siderurgia brasileira, principalmente na recuperação de sucatas e na redução direta do ferro. No entanto uma vez que a produção brasileira de ferro esponja, matéria-prima da redução direta, em 1977 foi de apenas 358.059 t, enquanto no mesmo ano o consumo de sucata foi de 4.576.254 t (IBS, 1983), nesta estimativa considerou-se a produção de aço em fornos elétricos em 1977 como sendo baseada apenas no uso de sucata.

Desta forma, adotou-se neste caso o exemplo de carga fornecido por ARAÚJO (1967), que descreve uma corrida de 33.800 kg de aço. A seguir os valores consolidados desta corrida são apresentados, com os valores calculados por tonelada de lingotes de aço produzida entre parênteses:

- sucata: 34.000 (1.005,9) kg;
- calcário: 2.500 (74,0) kg;
- fluorita: 570 (16,9) kg;
- minério ferro: 900 (26,6) kg;
- ferro manganês: 320 (9,5) kg;
- ferro silício: 130 (3,8) kg;
- carvão moído: 40 (1,2) kg;
- coque: 30 (0,9) kg;
- ligas: 395 (11,7) kg;
- alumínio: 13 (0,4) kg, e
- eletricidade: 25.700 (760,4) kWh.

Nos casos de fornos elétricos a quantidade de escória gerada é semelhante ao forno LD, apenas esta escória sendo mais densa (GELEILETE, 1998). De modo mais específico, SOBRINHO (2000) afirma que a geração média atual de fornos a arco elétrico é de 116 kg/ t aço, sendo que 75% desta é atualmente reciclada.

Do mesmo modo que nos tipos anteriores de forno, a escória dos fornos elétricos será considerada sub-produto, sem alocação de carga ambiental.

Quanto às emissões atmosféricas, uma vez que neste tipo de forno não ocorre queima de combustível, a geração de gás se resume à formação de uma emissão composta

principalmente de material particulado, contendo metais, e monóxido de carbono (LICCO, 1977).

Para uma aciaria elétrica, a emissão de particulados se encontra entre 4 e 32 kg por tonelada de aço, com valor médio de 18 kg/ t aço. Cabe dizer que devido aos teores de metais pesados muitas vezes estes resíduos são considerados Classe I – Perigosos (SOBRINHO, 2000). Além disso, LICCO (1977) afirma haver uma geração de CO da ordem de 7 a 10 kg/ t aço, com valor médio de 9,0 kg/ t aço, e de acordo com a FEEMA (1977) gera-se também uma emissão de fluoreto da ordem de 2 g/ t aço após o sistema de depuração.

Sobre a emissão de efluentes, existe pouca informação disponível sobre os despejos de aciarias elétricas. A informação mais confiável que pode ser levantada diz respeito a uma usina específica, e será adotada aqui com a ressalva de que pode não representar a média do setor.

De acordo com BRAILE, CAVALCANTI (1993), uma aciaria elétrica emite os seguintes contaminantes:

- sólidos suspensos: 15,0 g/ t aço, e
- fluoretos: 8,1 g/ t aço.

Segundo a FEEMA (1977) há geração de um lodo de sedimentação, numa taxa de 8 kg/ t aço.

A Tabela E.25 apresenta os valores para produção de 1,0t de lingotes em fornos elétricos, já aplicado o critério de corte.

Tabela E.25- Consumos e emissões da produção de 1,0t de lingotes em fornos elétricos.

Entradas			Saídas		
Sucata	1.005,9	kg	Lingotes	1.000,00	kg
Calcário	74,0	kg	Escória AF	116,00	kg
Fluorita	16,9	kg	Poluição atmosférica		
Minério ferro	26,6	kg	Particulado	18,00	kg
Eletricidade	760,4	kWh	CO	9,0	kg
			Fluoretos	2,0E-3	kg
			Efluente líquido		
			Sól. Susp.	15,0	g
			Fluoretos	8,1	g

e. alto-forno a coque

De acordo com BRADASCHIA (1974), o ferro gusa pode ser obtido em dois tipos de forno: os alto-fornos, tanto a coque como a carvão vegetal, e os fornos elétricos de redução. Segundo o IBS (1983) a produção de gusa por fornos elétricos no Brasil em 1977 representou apenas 2,0% do total, sendo assim desconsiderados neste estudo, admitiu-se assim toda a produção de gusa aos alto-fornos. Além disso, cabe salientar a existência de processos de redução direta do minério de ferro, mas que não apresentam escala industrial significativa (BRADASCHIA, 1974).

De acordo com a literatura (ABM, 1979, ARAÚJO, 1967, BRADASCHIA, 1974, CIODARO, 1979) há grande variação na operação dos alto-fornos no que diz respeito à composição da carga metálica e dos combustíveis utilizados, dependendo não só de características técnicas, mas principalmente de condições de mercado do minério de ferro, sinter, sucata, carvão, óleo combustível, etc.

Deste modo buscou-se uma quantificação média da composição típica da época e, dentre as diversas estimativas encontradas, decidiu-se utilizar aquela fornecida por MEYERS (1979), uma vez que esta publicação foi resultado de uma extensa pesquisa entre diferentes indústrias brasileiras, fornecendo dados médios tanto para alto-fornos a coque como a carvão vegetal, permitindo o uso nesta estimativa de dados obtidos com as mesmas técnicas, premissas, hipóteses e métodos de coleta de dados.

Desta forma, temos para a produção de uma tonelada de gusa líquido em alto-forno a coque, os seguintes consumos (MEYERS, 1979):

- coque: 550,0 kg;
- minério ferro: 1.650,0 kg;
- minério manganês: 10,0 kg;
- dolomita: 30,0 kg;
- calcário: 200,0 kg;
- refratário: 2,0 kg;
- eletricidade: 80,0 kWh;
- óleo combustível: 50,0 kg;
- água: 60,0 m³, e
- oxigênio: 50,0 Nm³.

Como pode ser visto, esta referência não fornece dados sobre o uso de sínter. Uma vez que diversas referências (CIODARO, 1979; JUVILLAR, 1980; LICCO, 1977; MASUDA, 1980) apresentam o uso de sínter na época, julgou-se importante alocar parte do consumo de minério de ferro ao sínter. Desta forma, adotou-se a repartição típica obtida na referência mais próxima a 1977, ano base destas estimativas, dada por JUVILLAR (1980), onde para a produção de 1t de gusa são consumidos 1.300 kg de sínter e 300 kg de hematita. Aplicando esta divisão ao valor total da estimativa aqui utilizada, 1.650 kg de ferro, temos um consumo de 1.340,6 kg de sínter e 309,4 kg de hematita.

Embora YOKOTE (2003) apresente uma estimativa para a produção de gusa a partir de coque, observando os dados de consumo de ambos os estudos, verificou-se diferenças substanciais na composição da carga adotada. Assim, decidiu-se realizar aqui uma estimativa das emissões da produção de gusa nacional a partir de coque nacional, por entender que mesmo incorrendo em alguns desvios, frutos de simplificações e hipótese, estes dados estariam mais próximos à realidade nacional de 1977 do que os encontrados em YOKOTE (2003).

Além do gusa obtém-se como resíduo do alto-forno a escória de alto-forno que neste caso, segundo JUVILLAR (1980), representa 270 kg/ t gusa. De acordo com SOBRINHO (2000), atualmente no Brasil 100% das escórias de alto-forno são recicladas.

Cabe dizer que as escórias de alto-forno são usadas para construção civil desde a Roma Antiga, e desde o século passado se conhece a possibilidade de sua incorporação ao cimento (GELEILETE, 1998). Atualmente as escórias de alto-forno são aproveitadas em produção de cimento (93,3%), além de outros usos como pavimentação, aterros, etc (IBS, 2002).

Na década de setenta, pelo que indica CETESB (1978), a escória de alto-forno já era comercializada sob diversas formas. Baseado nesta colocação, neste trabalho esta não será caracterizada como resíduo, e sim como sub-produto do ciclo de vida do aço, mas sem alocação de carga ambiental.

No que diz respeito às emissões atmosféricas, a operação de um alto-forno gera o gás de alto-forno, que segundo MASUDA (1980) é gerado na taxa de 320 m³/ t gusa, e que conforme ARAÚJO (1967) tem a seguinte composição:

- CO: 27,0 %;
- CO₂: 13,0%;
- H₂: 3,0 %, e
- N₂: 57,0%.

De acordo com CETESB (1978), este gás era totalmente utilizado em outras etapas de processo, após a remoção de poeiras, devido a seu poder calorífico (cerca de 850 kcal/ kg). Assim, após o tratamento estes são enviados a um gasômetro, onde são armazenados para uso posterior.

A mesma posição é apresentada por FEEMA (1977), que afirma que os gases de alto-forno são de grande interesse à indústria metalúrgica, e seu aproveitamento na época já era total, após a remoção de poeiras, sendo difícil ocorrer poluição por emissão deste gás.

No entanto, além dos efluentes gerados na limpeza deste gás, operações de abertura do forno e manuseio do gusa incandescente geram elevadas emissões instantâneas de monóxido de carbono e material particulado (ESTADOS UNIDOS, 1973, 1985b; LICCO, 1977). O valor destas emissões pode ser bastante alto segundo as referências, sendo que LICCO (1977), apresenta os seguintes valores:

- material particulado: 82,5 kg/ t gusa, e
- CO: 875 kg/ t gusa.

Em vista dos elevados valores destas emissões, buscou-se a referência original utilizada por LICCO (1977), a publicação conhecida como AP-42, compilação de fatores de emissão publicados pela EPA (ESTADOS UNIDOS, 1973). Nesta referência, afirma-se que as emissões acima são para o processo como um todo, e para sistemas sem controle de poluição. Embora segundo dados do IBS (1990) em 1977 já houvessem instalados no Brasil cerca de 100 equipamentos de controle de poluição ambiental nas siderúrgicas, entende-se que este valor é reduzido, basta para isso citar que na mesma referência é apresentado o valor de 607 equipamentos instalados em 1989, o que, considerando que houve pouco crescimento do número de usinas, demonstra que a penetração deste tipo de sistema era bastante tímida à época. Desta forma, manteve-se o valor apresentado por LICCO (1977), embora este não deva corresponder à situação atual, e mesmo para a época seja sobre- estimado.

Além destas emissões, de acordo com FEEMA (1977), podem haver também lançamentos de SO₂, H₂S e NO_x, mas em quantidades muito reduzidas. Desta forma, neste estudo estas serão desconsideradas.

Conforme BRAILE, CAVALCANTI (1999), este processo de limpeza dos gases para uso combustível é a principal fonte de despejos líquidos da produção de gusa. Deve-se ressaltar que até a década de setenta não era exigido das siderúrgicas que o efluente destes sistemas de tratamento fosse tratado, o que só ocorreu após a década de oitenta, sendo realizada apenas a decantação (HIGA, 1982). Desta forma, com o intuito de manter o conservadorismo desta estimativa adotar-se-á que era realizado apenas o tratamento por decantação deste efluente, gerado na vazão de cerca de 850 litros/ t de gusa, e possuindo os seguintes contaminantes (HIGA, 1982):

- sólidos suspensos: 0,040 kg/ t gusa (47 mg/l);
- amônia: 0,045 kg/ t gusa (53 mg/l);
- cianetos: 0,003 kg/ t gusa (3,5 mg/l), e
- fenóis: 0,002 kg/ t gusa (2,3 mg/l).

Além deste efluente, no processo de decantação obtém-se um resíduo sólido, decantado. De acordo com GELEILETE (1998), gera-se entre 1 e 20 kg de lodo, por tonelada de gusa. Para fins desta estimativa adotar-se-á o valor de 20 kg lodo/ t gusa. Um outro efluente representativo da produção de coque são as águas de resfriamento, mas segundo HIGA (1982) estas não apresentam contaminantes em quantidade significativa, bastando seu resfriamento para lançamento em corpos d'água. Desta forma, nesta estimativa não contabilizaremos nenhum aspecto ambiental relativo a este efluente.

A Tabela E.26 apresenta os valores consolidados para a produção de 1,0t de gusa, já aplicado o critério de corte.

Tabela E.26- Consumos e emissões na produção de 1,0t de gusa em alto-forno à coque.

Entradas			Saídas		
Coque	550,0	kg	Gusa	1.000,0	kg
Mín. Ferro	309,4	kg	Escória AF	270,0	kg
Sinter	1.340,6	kg	Gás Af	320,0	m ³
Calcário	200,0	kg	Poluição atmosférica		
Dolomita	30,0	kg	CO	875	kg

(continua)

Tabela E.26- (continuação)

Entradas			Saídas		
Eletricidade	80,0	kWh	Poluição atmosférica		
Óleo combustivel	50,0	kg	Particulado	82,5	kg
Água	60,0	m ³	Efluente líquido		
Oxigênio	50,0	Nm ³	Sól. Susp.	40,0	g
			Amônia	45,0	g
			Cianeto	3,0	g
			Fenol	2,0	g
			Resíduo sólido		
			Lodo	20,0	kg

O volume de oxigênio pode também ser expresso em termos mássicos, admitindo comportamento de gás perfeito. Nesta situação, temos 32 g/ mol de O₂, e considerando que à CNTP 1 mol de gás perfeito ocupa 22,4 Nm³, temos que 1 Nm³ de O₂ pesa 1,43 gramas, o que resulta num consumo de 71,4 g de oxigênio/ t gusa.

f. alto-forno a carvão vegetal

Para estimar os consumos na carga e operação de um alto-forno a carvão vegetal, decidiu-se utilizar como referência os valores fornecidos por MEYERS (1979), uma vez que, como já apresentado para a produção de gusa a partir do coque, são dados da década de setenta frutos de um estudo feito especificamente sobre as diversas empresas do setor instaladas no Brasil à época.

Deve-se ressaltar que, novamente, estes valores são muito variáveis, tanto em função de tecnologia de construção do alto-forno como em função da montagem da carga, i.e., a proporção de ferro advinda de minério, sínter ou sucata. No caso aqui utilizado admite-se o aporte de ferro apenas proveniente do minério *in natura*, por esta ser a principal rota na época, principalmente nas usinas de médio porte com este tipo de processo. Já na época, mas principalmente posteriormente, o uso de sucatas e de sínter (muitas vezes produzido com os próprios finos do carvão vegetal no lugar do coque) apresentou-se como uma alternativa a esta rota. No entanto para fins deste estudo admitiremos que toda a produção de gusa em alto-fornos a carvão vegetal era obtida com os seguintes consumos por tonelada de gusa (MEYERS, 1979):

- carvão vegetal : 820,0 kg;
- minério ferro: 1.650,0 kg;
- minério manganês: 30,0 kg;

- calcário: 100,0 kg;
- quartzo: 60,0 kg;
- refratário: 1,7 kg;
- eletricidade: 65,0 kWh;
- óleo combustível: 5,0 kg, e
- água: 12,0 m³.

Os dados relativos à produção de gusa de carvão vegetal são mais escassos, possivelmente devido à idade avançada de algumas plantas. Desta forma, na ausência de informações confiáveis sobre a geração de poluição atmosférica e das águas, admitiremos como hipótese de simplificação a geração dos mesmos rejeitos da produção de gusa com coque para este caso de uso do carvão vegetal. Esta hipótese deve introduzir desvios, mas estes não devem ser demasiadamente grandes uma vez que a natureza das emissões é basicamente a mesma, e sua quantidade depende muito mais da eficiência dos sistemas de lavagem dos gases que das próprias variações da carga no processo.

A única exceção é quanto à quantidade de escória produzida, que segundo a ABM (1975) é de 100 a 150 kg/ t gusa. Neste estudo, por conservadorismo, consideraremos o valor de 150 kg/ t gusa.

A Tabela E.27 apresenta os valores consolidados para a produção de 1,0t de gusa num alto-forno de carvão vegetal.

Tabela E.27- Consumos e emissões para a produção de 1,0 t de gusa em alto forno à carvão vegetal.

Entradas			Saídas		
Carvão vegetal	820,0	kg	Gusa	1.000,0	kg
Min Ferro	1.650,0	kg	Escória AF	150,0	kg
Min Manganês	30,0	kg	Gás Af	320,0	m ³
Quartzo	60,0	kg	Poluição atmosférica		
Calcário	100,0	kg	CO	875	kg
Eletricidade	65,0	kWh	Particulado	82,5	kg
Água	12,0	m ³	Efluentes líquidos		
Óleo combustível	5,0	kg	Sól. Susp.	40,0	g
			Amônia	45,0	g
			Cianeto	3,0	g
			Fenol	2,0	g
			Resíduo Sólido		
			Lodo	20,0	kg

g. sinterização

Considerando o fato que, segundo CIODARO (1979) a pelletização é um processo relativamente novo, e que na década de 70 menos de 10% da produção na Europa Ocidental e Japão baseava-se neste processo, e que à época esta participação era certamente menor no Brasil, esta rota de preparo do ferro não será considerada nesta estimativa.

Quanto à sinterização, embora em alguns poucos fornos de carvão vegetal os finos deste sejam usados, o principal combustível adicionado ao sinter é o coque (CIODARO, 1979). Desta forma, para fins desta estimativa vamos admitir que todo o sinter no Brasil de 1977 era produzido a partir de coque.

A composição do sinter apresenta grande variação entre cada planta, mas uma estimativa média é fornecida por ARAÚJO (1997), onde para cada tonelada de sinter são consumidos:

- 847 kg minério de ferro fino;
- 90 kg de retorno de finos do alto-forno;
- 129 kg calcário;
- 22 kg de escória de alto-forno;
- 55 kg de coque;
- 420 kg de retorno de finos da sinterização;
- 90 Nm³ de gás de coqueria;
- 0,5 m³ de água, e
- 25 kWh de eletricidade.

Segundo GELEILETE (1998), na sinterização gera-se cerca de 10 a 40 kg de particulados por tonelada de sinter produzido, dependendo da qualidade das matérias-primas e do sistema de despoeiramento. Estes em geral são reutilizados, exceto no caso de conterem grandes quantidades de álcalis. De acordo com JUVILLAR (1980), a perda média é de 28,3 kg de poeira/ t sinter no processo.

Como sub-produto, a sinterização emite um gás, reutilizado no processo siderúrgico, que contém (JUVILLAR, 1980):

- vapor d'água: 104,4 kg de vapor d'água/ t sinter ;
- 1.546 m³ gases/ t sinter, com a seguinte composição:
 - CO₂: 108,2 m³;

- CO: 10,8 m³;
- N₂: 1.222,9 m³, e
- O₂: 204,1 m³.

À parte deste gás reutilizado, há emissões para a atmosfera. Segundo a FEEMA (1977), após os sistemas de tratamento as emissões atmosféricas da sinterização são:

- material particulado: 5-50 kg/ t sinter;
- SO₂: 0,8 a 1,5 kg/ t sinter;
- CO: 20 kg/ t sinter;
- H₂S: desprezível;
- NO_x: 0,5 kg/ t sinter, e
- fluoretos: 0,3- 150 ppm.

Para fins desta estimativa usaremos, como já justificado, os valores máximos apresentados, cientes de que isso configura uma super estimativa.

A limpeza dos gases anteriormente citados gera efluentes líquidos, que após tratamento são lançados em corpos d'água. Admitindo a limpeza dos gases de sinterização por via úmida, gera-se uma água residual que apresenta os seguintes contaminantes após a depuração (FEEMA, 1977):

- sólidos suspensos: 87 mg/l;
- sólidos dissolvidos: 354 mg/l;
- hexano: 3 mg/l;
- amoníaco: 2,9 mg/l;
- cianeto: 0,05 mg/l;
- fenóis: 18 mg/l, e
- ferro: 3,6 mg/l.

BRAILE, CAVALCANTI (1999) apresentam o valor de 209 l efluente gerado/ t sinter, como estimativa para sistemas via úmida, e fornece ainda a emissão de:

- óleos e graxas: 10 mg/l;
- sulfetos: 20 mg/l, e
- fluoretos: 50 mg/l.

A Tabela E.28 a seguir consolida os aspectos ambientais estimados para a sinterização.

Tabela E.28- Consumos e emissões da produção 1,0t de sinter.

Entradas			Saídas		
Mín. Ferro	847,00	kg	Sinter	1.000,00	kg
Calcário	129,00	kg	Vapor d'água	104,40	kg
Coque	55,00	kg	Gás sinterização	1.546,00	m3
Retorno finos AF	90,00	kg	CO2	108,20	m3
Escória AF	22,00	kg	CO	10,80	m3
Retorno finos sint.	420,00	kg	O2	204,10	m3
Gás coqueria	90,00	Nm3	N2	1.222,90	m3
Água	0,50	m3	Emissões atmosféricas		
Eletricidade	25,00	kWh	Particulado	28,3	Kg
			Emissões atmosféricas		
			SO ₂	1,5	Kg
			CO	20,0	Kg
			NO _x	0,5	kg
			Efluentes líquidos		
			SS	18,18	g
			Sol Dissolv	73,99	g
			Óleos e graxas	2,09	g
			Fluoretos	10,45	g
			Sulfetos	4,18	g
			Hexano sol.	0,63	g
			Cianeto	0,01	g
			Fenol	3,76	g
			Ferro	0,75	g
			Amoníaco	0,61	g

Para fins de simplificação será considerado que as usinas fornecedoras de Itaipu são todas de grande porte e integradas. Desta forma, consideraremos a produção de sinter na própria usina siderúrgica, desprezando a etapa de transporte destes para as demais etapas do processo.

h. coqueificação

De acordo com FEEMA (1977) e SOBRINHO (2000), a coqueria é o ponto de maior potencial de poluição ambiental de uma usina siderúrgica integrada. As coquerias são instalações industriais de grande complexidade, pois a destilação do carvão produz diversas substâncias que além de altamente tóxicas são de interesse econômico para a indústria siderúrgica, como o gás de coqueria (GCO), o alcatrão, os óleos leves, etc, que desde muito antes da década de setenta já eram recuperados para uso interno ou revenda (FEEMA, 1977). Assim, além das baterias de fornos de coqueificação existem plantas de recuperação destes sub-produtos e sistemas de tratamento de emissões e efluentes compostos de grande número de equipamentos.

Revisando a literatura da época no Brasil (ABM, 1979, ARAÚJO, 1967, BRADASCHIA, 1974, CETESB, 1978, CIODARO, 1979, FEEMA, 1977, HIGA, 1982, JUVILLAR, 1980, LICCO, 1977, MASUDA, 1980), foram encontrados apenas alguns valores orientativos dos aspectos ambientais, sem o necessário nível de detalhes exigido nesta estimativa. A maioria dos valores, além de limitados, restringiam-se às saídas dos processos, não contabilizando as características dos efluentes e emissões após os sistemas de controle de poluição. Além disso, os poucos dados apresentados para a situação dos lançamentos ao meio ambiente referem-se a dados de outros países, principalmente da agencia americana de proteção ambiental (EPA).

Desta forma, e considerando que o processo de coqueificação apresenta mais variações entre plantas do que entre países, considerou-se a possibilidade de usar os dados levantados por YOKOTE (2003) na estimativa deste processo. Tendo em conta que os dados usados por este autor são, no caso do coque, diretamente compilados de uma base internacional de ACV, o *Data Archives* do SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003), é de se esperar que sua precisão seja muito maior que a que poderia ser obtida caso fosse realizada alguma aproximação com os limitados dados encontrados para a realidade brasileira.

De modo a verificar a validade de uso desta base no entanto, levantou-se informações sobre o consumo de insumos do processo de coqueificação para o Brasil na década de setenta, estes sim disponíveis na literatura.

Segundo ARAÚJO (1967), nas condições brasileiras da época 1 t de mistura seca de carvões proporcionavam numa coqueria:

- 750 kg coque (sendo 60 kg destes em finos);
- 36 kg alcatrão- que inclui: 18,5 kg piche, 15,0 kg óleos leves e 2,5 kg de naftaleno;
- 7,28 kg de benzol- que inclui: 5,35 kg de benzeno, 1,25 kg tolueno e 0,68 kg xileno, e
- 12 kg de sulfato de amônio.

Além do carvão, segundo CIODARO (1979), uma coqueria basicamente consome, por tonelada de carvão admitido:

- gás de coqueria recirculado: 58,5 Nm³ (admitindo 0,45 g/ Nm³ - 26,3g);
- gás de alto-forno: 531,8 Nm³ (admitindo 0,45 g/ Nm³ - 239,3g);
- vapor: 28,6 kg;
- eletricidade: 11,8 kWh, e
- água: 7,1 m³.

Utilizando o dado anterior, de 750 kg de coque obtidos para cada tonelada de carvão, podemos converter estes valores para:

- gás coqueria: 78,00 Nm³/ t coque (admitindo 4.400 kcal/ Nm³ = 18,59 MJ/ Nm³, são 1.450 MJ/ t coque);
- gás de alto- forno: 709,07 Nm³/ t coque (admitindo 770 kcal/ Nm³ = 3,22 MJ/ Nm³, são 2.283 MJ/ t coque);
- vapor: 38,13 kg/ t coque;
- eletricidade: 15,73 kWh/ t coque (56,6 MJ/ t coque), e
- água: 9,47 m³/ t coque.

E como saída, além do coque, produz-se (para cada tonelada de coque):

- alcatrão: 48,00 kg, de onde se extrai: Piche: 24,67 kg; óleos leves: 20,00 kg e naftaleno: 3,33 kg;
- benzol: 9,71 kg, de onde se obtém: Benzeno: 7,13 kg; tolueno: 1,67 kg e xileno: 0,91 kg;
- sulfato de amônia: 16,00 kg, e
- gás coqueria: 204,00 kg, composto por:
 - H₂: 117,10 kg;
 - CH₄: 53,86 kg;
 - CO: 14,28 kg;
 - N₂: 8,36 kg;
 - C₂H₆: 6,12 kg, e
 - CO₂: 4,28 kg.

Na base de dados de YOKOTE (2003), os consumos para 1,0 kg de coque são:

- carvão: 1,33 kg;
- eletricidade: 0,14 MJ, e
- gás de alto- forno: 6,18 MJ.

Verifica-se assim a exata proporção de conversão de carvão em coque, tendo como energéticos a eletricidade e o gás de alto forno, mostrando grande similaridade com o caso brasileiro. Embora o consumo elétrico seja distinto, 0,057 MJ/ kg coque no caso brasileiro e 0,324 MJ/ kg coque na base de YOKOTE (2003), o consumo energético dos gases é similar, sendo 4,108 MJ/ kg coque no caso brasileiro e 4,527 MJ/ kg coque no caso de YOKOTE (2003). Apenas deve-se ressaltar que a presença de uma parcela de gás de coqueria pode alterar, ligeiramente, a composição final de alguns aspectos ambientais.

Uma vez que a base usada por YOKOTE (2003), obtida das bases do SimaPro (PRE CONSULTANTS, 2003), foi validada, decidiu-se utiliza-la aqui como aproximação na produção de aço brasileira em 1977. No entanto, cabe citar que acrescentou-se o consumo de água, não incluído, com o valor indicado por CIODARO (1969), de 9,47 m³/ t coque.

Devido à baixa qualidade do carvão brasileiro, desde o princípio de nossa siderurgia grande parte do carvão era importado. Deste modo serão criados neste processo dois consumos de carvão: o carvão nacional e o carvão importado.

Segundo dados do setor (IBS, 1983), em 1977 o Brasil consumiu 4.597.218 t de carvão metalúrgico, sendo que 3.579.716 t (77,9%) era importado.

Considerando esta divisão sobre o carvão consumido neste processo, estimou-se o consumo de 1,03867 kg de carvão importado/ kg coque, e 0,29467 kg carvão nacional/ kg coque.

Com estas modificações, as entradas e saídas do processo de coqueificação podem ser estimadas como apresentado na Tabela E.29 a seguir.

Tabela E.29- Consumos e emissões para a produção de 1,0 t de coque.

Entradas			Saídas		
Carvão importado	1.038,67	kg	Coque	1.000	kg
Carvão nacional	294,67	kg	Poluição atmosférica		
Eletricidade	140	MJ	Amônia	5,00	g
Gás de alto-forno	6.180	MJ	Benzeno	3,50	g
Água	9,47	m ³	Benzopireno	0,06	g
			CO	820,00	g
			CO ₂	223,00	kg
			Hidrocarboneto	527,00	g
			F ₂	1,90	g

(continua)

Tabela E.29- (continuação)

Entradas	Saídas	
	Poluição atmosférica	
	Particulado	235,00 µg
	Fluoreteno	0,60 µg
	Gás coqueria	256,00 µg
	H2S	270,00 µg
	Fuligem	89,00 µg
	NOx	370,00 µg
	PAHs	8,10 µg
	SO2	1,40 kg
	Sulfato amônia	0,37 µg
	Tolueno	2,60 µg
	Xileno	2,80 µg
	Poluição das águas	
	Cu	0,03 µg
	Hidrocarbonetos	5,00 µg
	Hg	0,01 µg
	N-tot	1,00 kg
	PAH's	0,01 µg
	Pb	0,10 µg
	Zn	0,07 µg

i. obtenção minério de ferro

A principal fonte de ferro da indústria siderúrgica no Brasil é a hematita, o tipo de minério de ferro predominante no país, que consiste num óxido de ferro (Fe_2O_3) adicionado à sílica (SiO_2). Para o Brasil, tem-se no minério de ferro um percentual de 5 a 10% de ganga, e de 63 a 66,5% de ferro (CARDOSO, 1988a).

Em 1977 o Brasil era o terceiro maior produtor de ferro do mundo, sendo que neste ano exportou 58.751.000 toneladas de minério, enquanto consumiu apenas 14.938.000 toneladas (IBS, 1983).

As maiores jazidas brasileiras de minério de ferro estão localizadas no quadrilátero ferrífero (MG), região de Urucum (MT) e Serra dos Carajás (PA), segundo LICCO (1977). No entanto, segundo PEREIRA (1993), o ferro extraído de Urucum e Carajás é todo exportado, enquanto o mercado interno é abastecido apenas pelo quadrilátero ferrífero.

Para fins desta estimativa, vamos admitir que todo o ferro na década de setenta também provinha destas reservas, o que embora não tenha sido comprovado na literatura da época é o mais provável, uma vez que BAER (1970) cita como reservas importantes duas áreas desta localidade.

Ao contrário dos demais recursos naturais, para o minério de ferro serão contabilizados os aspectos ambientais do processo de extração, num processo denominado “Máquinas de mineração”. Na verdade o que será contabilizado é o consumo de diesel e as emissões atmosféricas associadas ao uso de máquinas na lavra, usando para isso as estimativas de YOKOTE (2003), compiladas da base de dados *BUWAL*, disponível no SimaPro (PRÉ CONSULTANTS, 2003). Nesta estimativa tem-se:

- consumo de energia -mineração: 0,1 MJ da máquina mineração/ kg minério ferro;
- consumo de diesel: 0,0235 kg/ MJ de operação da máquina de mineração, e
- emissões atmosféricas:
 - PM₁₀: 0,094 g/ MJ de operação da máquina de mineração;
 - CO: 0,468 g/ MJ de operação da máquina de mineração;
 - SO₂: 0,094 g/ MJ de operação da máquina de mineração;
 - CO₂: 0,076 kg/ MJ de operação da máquina de mineração;
 - NO_x: 1,17 g/ MJ de operação da máquina de mineração, e
 - hidrocarbonetos: 0,234 g/ MJ de operação da máquina de mineração.

O transporte do ferro em geral se dá por via férrea, seguido em alguns casos da marítima. Segundo PEREIRA (1993), para consumo em São Paulo e Rio de Janeiro o minério é transportado pela Estrada de Ferro Central do Brasil, até o Rio de Janeiro, de onde segue para Santos por via marítima.

BAER (1970) apresenta a mesma rota para o minério do Vale de Paraopeba, mas para o minério do Vale do Rio Doce afirma que a rota utilizada é a Estrada de Ferro Vitória- Minas, que liga o Quadrilátero ao porto de Vitória.

Para o Estado de Minas Gerais, temos que 90,2% da produção de laminados provém de quatro usinas: USIMINAS, MANNESMANN, Belgo- Mineira e ACESITA (IBS, 1983). Verificando a localização destas usinas (municípios de Belo Horizonte, Acesita, Ipatinga e Sabará) no mapa (MAGNOLI, 1992), nota-se que todas as plantas estão ao redor do Quadrilátero, sendo as mais distantes a da USIMINAS e ACESITA. Para estas, BOAS (1966) afirma existir um transporte ferroviário do minério de ferro pela Estrada de Ferro Vitória- Minas, num trajeto de cerca de 100 km. Assim, para os fins deste trabalho admitir-se-á que para a produção de aço em Minas Gerais, todo o minério de ferro era transportado por ferrovia por 100 km.

Para a produção em São Paulo e no Rio de Janeiro será adotado o transporte ferroviário pela Estrada de Ferro Central do Brasil. Para as plantas no Rio de Janeiro será admitida a distância de 420 km, segundo dados de BOAS (1966) para a planta de Barra Mansa, enquanto para São Paulo será utilizada a distância de 750 km, adotada pelo mesmo autor para a planta da Aliperti.

j. obtenção de carvão mineral

Há quatro tipos de carvão mineral: turfa, linhito, hulha e antracito. Destes, apenas a hulha possui aplicação metalúrgica. Cabe dizer que o carvão metalúrgico brasileiro é de baixa qualidade, não possuindo qualidade para obtenção de um bom coque. Desta forma necessita ser misturado ao carvão mineral importado para obter uma composição satisfatória (CARDOSO, 1988a).

Como já apresentado, segundo dados do IBS (1983) em 1977 77,9% do carvão metalúrgico brasileiro era importado. Embora não se tenha conseguido dados da procedência do carvão importado pelo Brasil para 1977, segundo a ABM (1979), em 1976 63,0% do carvão importado era proveniente dos EUA, e 35,3% da Polônia. Para os fins deste estudo admitiremos estas percentagens, alocando ainda os 1,7% restantes à Polônia, por ser esta a procedência mais distante, deixando assim a estimativa conservadora do ponto de vista do transporte.

Cabe dizer ainda que como meio de transporte admitiremos o transporte marítimo até os portos de Santos/ SP e Rio de Janeiro/ RJ, de onde segue por via férrea até as usinas.

Nesta caso, as distâncias a serem transportadas serão estimadas em:

- via marítima (baseada em medições sobre mapa-múndi):
 - Estados Unidos: 10.000 km, e
 - Polônia: 12.000 km.
- via férrea:
 - para São Paulo: 50 km (distância aproximada em linha reta entre São Paulo- Santos);
 - para Rio de Janeiro: 75 km (distância aproximada em linha reta entre Rio de Janeiro e Volta Redonda), e

- para Minas Gerais: 420 km (distância utilizada para transporte do minério de ferro entre o Quadrilátero Ferrífero e Rio de Janeiro).

Já o carvão brasileiro coqueificável utilizado na década de setenta era proveniente da formação Rio Bonito, em Crisciúma/ Santa Catarina, único depósito descoberto até a época (ABM, 1979). Segundo a referência, o transporte deste carvão se dava por via férrea, a chamada Divisão Operacional de Tubarão, da Rede Ferroviária Federal S.A. As distâncias de transporte estimadas pela distância em linha reta entre Crisciúma e São Paulo, depois entre São Paulo e Rio de Janeiro e São Paulo e Belo Horizonte, são:

- para São Paulo: 625 km;
- para Rio de Janeiro: 950 km, e
- para Minas Gerais: 1.125 km.

k. obtenção do carvão vegetal

O carvão vegetal é obtido por meio da pirólise da lenha, sendo que ao contrário do que aconteceu nos países industrializados, no Brasil o uso industrial do carvão vegetal continua sendo largamente praticado, sendo que atualmente o país é o maior produtor mundial desse insumo energético. No setor industrial (quase 85% do consumo), o ferro-gusa, aço e ferro-ligas são os principais produtos para os quais se consome carvão de lenha, sendo que em 1977 o consumo nacional deste insumo foi de 6.785.135 toneladas (IBS, 1983).

Basicamente o processo de produção do carvão vegetal em escala industrial, denominado carvoejamento, consiste em realizar a pirólise da madeira, ou seja, a quebra de ligações complexas deste material por aplicação de calor (MASUDA, 1980). Esta operação é realizada em fornos de alvenaria com ciclos de aquecimento e resfriamento que duram até vários dias, com temperatura máxima média de carbonização de 500°C. Nestes, o rendimento em massa do carvão vegetal em relação a lenha seca enforada é de aproximadamente 25%, e além do carvão obtém-se um licor, denominado licor pirolenhoso, cuja geração pode chegar a 50% em massa da lenha, sendo o restante da massa da lenha perdida na forma de gases (IEE, 2003). Ainda que atualmente este licor seja recuperado, segundo MASUDA (1980)

até a década de 80 no Brasil estes subprodutos do carvoejamento não eram aproveitados.

Sobre o transporte do carvão vegetal para as usinas, segundo MEYERS (1979), na década de setenta cerca de 70% do carvão vegetal era transportado via rodoviária, em caminhões de 48 ou 60 m³, que para as usinas de Minas Gerais rodavam sempre menos de 700 km, enquanto para as usinas de São Paulo e Rio de Janeiro, rodavam 1.000 km. Além disso, os 30% restantes do transporte era realizado por via férrea, em vagões de 54 ou 80 m³, tendo em vista que, segundo a ABM (1975), em 1975 80% da produção de aço por carvão vegetal estava em Minas Gerais, e 20% entre São Paulo e Rio de Janeiro.

Deve-se contabilizar que cerca de 10% do carvão é perdido ainda no transporte e manuseio (FERREIRA, 2003).

Quanto ao processo de obtenção, pode-se dizer que a composição da madeira, seu teor de umidade e outros fatores influenciam a geração de carvão vegetal e seus subprodutos, mas de modo genérico, e tomando dados médio do setor, para cada tonelada de madeira seca alimentada no forno, temos na saída (MASUDA, 1980):

- 330 kg de carvão vegetal (densidade= 250 kg/ m³);
- 250 kg de gases não condensáveis- composto por (FERREIRA, 2003):
 - 155,0 kg de CO₂;
 - 85,0 kg de CO;
 - 6,07 kg CH₄;
 - 1,58 kg H₂;
 - 0,32 kg eteno, e
 - 2,03 kg outros.
- 420 kg de solução pirolenhosa- composta por (MASUDA, 2003):
 - 228,0 kg água;
 - 120,0 kg alcatrão;
 - 50,2 kg ácido acético;
 - 18,2 kg metanol;
 - 1,3 kg acetona;
 - 1,6 kg metil acetato, e
 - 0,7 kg acetaldeído.

Embora tenha sido responsável pelo extenso processo de desmatamento ocorrido neste século no interior do Brasil, principalmente no Estado de Minas Gerais, a produção de carvão vegetal ainda é uma atividade de extrema importância para a indústria siderúrgica nacional (ABM, 1975), sendo que segundo FERREIRA (2003), o eucalipto reflorestado é a principal madeira utilizada para fins de obtenção de carvão vegetal siderúrgico. De fato, já na década de 70 a extração de madeiras para a produção do carvão vegetal não se baseava nas matas nativas, sendo realizados grandes projetos de reflorestamento com base no eucalipto (MASUDA, 1980).

Segundo (MASUDA, 1980), estas florestas tinham à época uma produtividade de 100 a 120 m³ lenha/ha o que considerando a idade de corte de seis anos (FERREIRA, 2003) e utilizando o valor máximo, resulta numa produtividade anual de 20 m³ madeira/ ha. Tendo como referência uma densidade média do eucalipto de 0,62 t/ m³ (FERREIRA, 2003), obtém-se uma produção de 12,4t madeira/ha.ano. Considerando que 20% da massa da madeira é composta de água (FERREIRA, 2003), temos ao final uma produtividade de 9,92 t madeira seca/ ha. ano.

Se considerarmos que para cada tonelada de madeira seca temos 330 kg de carvão vegetal, podemos afirmar que há um consumo de 3,300 t madeira seca/ t carvão. Se considerarmos que para cada tonelada de madeira seca temos 330 kg de carvão vegetal, podemos afirmar que há um consumo de 3,03 t madeira seca/ t carvão vegetal.

Utilizando a produção vegetal apresentada, de 9,92 t madeira seca/ ano.ha, e tendo em vista o horizonte de análise de 100 anos, temos que nestes 100 anos cada hectare será capaz de produzir 992 t de madeira seca. Desta forma, para obter-se as 3,03 t de madeira seca para cada tonelada de carvão vegetal, são necessários 0,003 ha, o que significa $3,0 \cdot 10^{-5}$ km²/ t carvão vegetal.

Nesta primeira aproximação não serão considerados os aspectos ambientais do ciclo de vida desta madeira, como consumo de água, diesel para plantio e corte, fertilizantes, etc, mas recomenda-se que em futuros refinamentos destes dados estes sejam incluídos.

A madeira também pode ser quantificada em termos volumétricos. Neste caso, adota-se que a madeira fresca tem 20% de umidade, e densidade 0,62 t/ m³ (FERREIRA,

2003). Desta forma, os 3.300 kg de madeira seca se tornam 4.125 kg, ou 6,653 m³ de madeira fresca.

A Tabela E.30 a seguir apresenta os dados consolidados para a obtenção de 1,0 t de carvão vegetal.

Tabela E.30- Consumos e emissões da obtenção de 1,0t de carvão vegetal

Entradas		Saídas	
Madeira seca	3330 kg	carvão vegetal	1.000 kg
(ou 4.125 kg- 6,653 m ³ de madeira fresca)		Emissões Atmosféricas	
		CO ₂	516,15 kg
		CO	283,05 kg
		CH ₄	20,2131 kg
		H ₂	5,2614 kg
		Eteno	1,0656 kg
		COV	6,7599 kg
		Efluentes líquidos	
		alcatrão	399,6 kg
		ác. Acético	167,166 kg
		metanol	60,606 kg
		acetona	4,329 kg
		metil acetato	5,328 kg
		acetaldeído	2,331 kg
		Emissões não materiais	
		uso do solo	2,97.10 ⁻⁵ Km ²

Além dos processos acima descritos, para que se possa ter um inventário do ciclo de vida do aço nesta estimativa, é necessário estimar a obtenção das principais matérias-primas do processo, a saber: minério de ferro, carvão mineral, carvão vegetal, oxigênio, fundentes e sucata. Estas etapas são a seguir descritas.

1. produção de oxigênio

Uma vez que a produção de oxigênio é um processo bastante padronizado, adotou-se para a estimativa de seus aspectos ambientais os valores utilizados por YOKOTE (2003), baseados na base australiana (RMIT, 2003), com a matriz energética substituída pela eletricidade transmitida em 1977 no Brasil, estimada neste Anexo.

Segundo YOKOTE (2003), a obtenção de oxigênio se dá em um processo simples onde ocorre a aplicação de eletricidade ao ar, produzindo além do oxigênio o argônio e o nitrogênio. A alocação entre os três produtos do processo se dá pela base mássica. Desta forma tem-se, para cada 1,0 kg de ar, os seguintes valores:

- consumo de eletricidade: 0,1 MJ;
- produtos:
 - oxigênio: 0,201 kg;
 - nitrogênio: 0,791 kg, e
 - argônio: 0,008 kg.

m. fundentes

Segundo BRADASCHIA (1974), os principais fundentes da siderurgia brasileira são o calcário e a dolomita com mais de 60% de carbonatos. Além destes se utiliza em alguns casos o quartzo.

No Brasil os principais depósitos destes materiais ocorrem nos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná (LICCO, 1977), sendo que o consumo destes materiais em 1977 foi de 2.155.581 t de calcário e 431.892 t de dolomita (IBS, 1983). BOAS (1966) afirma que existem depósitos destes materiais próximos a quase todas as usinas, o que também é dito pela ABM (1975). Uma vez que BAER (1970) afirma que as distâncias transportadas destes nunca ultrapassam 300 km, nesta estimativa será adotado este valor para o transporte de dolomita, calcário e quartzo, feito em caminhões de 30 t.

n. sucata

As sucatas utilizadas na siderurgia são classificadas em dois tipos: as sucatas internas, de origem nas operações de desbaste e laminação das aciarias, e as sucatas externas, oriundas de resíduos pós uso de máquinas e componentes de ferro ou aço (CARDOSO, 1988b).

No ano de 1977, no Brasil foram consumidas 4.576.254 toneladas de sucatas, sendo 2.363.035 t (51,6%) geradas internamente às plantas, e 2.208.128 t (48,4%) adquiridas externamente (IBS, 1983).

Uma vez que grande parte da sucata usada na siderurgia é de origem interna da própria usina (principalmente da laminação), além do que a geração de sucata de ferro ocorre em todos os pontos do território nacional, nesta estimativa não será considerado o transporte da sucata até as siderúrgicas.

Além das matérias-primas mencionadas, a indústria siderúrgica ainda consumiu em 1977 137.431 toneladas de manganês (IBS, 2003). Uma vez que, segundo BAER (1966) e BOAS (1970) as reservas se localizam próximas às de minério de ferro, serão admitidas as mesmas condições de transporte do ferro para o manganês.

Consolidando todos estes dados, pode-se finalmente apresentar o inventário do ciclo de vida do aço, com as hipóteses deste estudo. A Tabela E.31 fornece esta informação.

Tabela E.31- Inventário de ciclo de vida do aço laminado.

	Unid.	Aço laminado
		(/ kg aço)
Consumo de Recursos		
Água	kg	33,6
Ar	kg	8,79E-05
Argila	kg	7,98E-06
Bauxita	kg	0,000084
Calcita	kg	0,313
Carvão	kg	0,375
Dolomita	kg	0,00687
Energia (inespec.)	MJ	0,091
En. Carvão	MJ	0,002
En. Gás natural	MJ	0,529
En. hidrelétrica	MJ	1,75
En. Petróleo	MJ	0,128
En. Urânio	MJ	0,002
Fluorita	kg	0,00469
Gás Natural	kg	0,000574
Madeira	kg	1,01
Min. Ferro	kg	1,18
Min. Manganês	kg	0,009
Petróleo	kg	0,242
Quartzita	kg	0,018
Sal gema	kg	3,99E-05
Sucata aço	kg	0,463
Emissões atmosféricas		
1,3 Butadieno	kg	2,25E-07
Amônia	kg	1,51E-06
Benzeno	kg	8,03E-06
Benzopireno	kg	1,68E-08
CaO	kg	0,0086
CH4	kg	0,00498
Chumbo	kg	1,17E-10

(continua)

Tabela E.31- (continuação)

	Unid.	Aço laminado
		(/ kg aço)
Emissões atmosféricas		
CO	kg	0,789
CO2	kg	0,464
COV	kg	0,00167
COV-exceto CH4	kg	0,000233
Etano	kg	0,000262
F2	kg	5,33E-07
FeO	kg	0,0058
Fluoreteno	kg	1,68E-07
Fluoreto	kg	0,000012
Fuligem	kg	0,000127
H2	kg	0,00129
H2S	kg	7,61E-05
Hidrocarbonetos	kg	0,000826
Hidrocarb. Alifát.	kg	7,21E-05
Hidrocarb.Aromát.	kg	2,27E-06
HCl	kg	1,04E-07
Inespec.	kg	7,18E-05
Mercúrio	kg	5,82E-14
Metais pesados	kg	2E-07
Metil- mercaptano	kg	2,83E-09
N2O	kg	2,33E-07
NO2	kg	6,19E-05
NOx	kg	0,00446
Particul. (inesp.)	kg	0,0958
Petróleo	kg	3,76E-05
Poeira	kg	0,00693
PM10	kg	1,47E-05
SO2	kg	0,0104
SOx	kg	0,00034
Tolueno	kg	7,3E-07
Xileno	kg	7,86E-07
Efluentes líquidos		
Ác. Acético	kg	0,0411
Acetaldeído	kg	0,000573
Acetona	kg	0,00106
Ácido (H+)	kg	5,99E-06
Alcatrão	kg	0,0983
Amoníaco	kg	3,68E-07
Chumbo	kg	2,81E-08
Cianeto	kg	2,26E-06
Cl-	kg	7,88E-06
Cobre	kg	8,42E-09
Cromo 3+	kg	1,04E-08

(continua)

Tabela E.31- (continuação)

	Unid.	Aço laminado
		(/ kg aço)
Efluentes líquidos		
DQO	kg	5,16E-07
Fenol	kg	3,78E-06
Ferro	kg	3,81E-05
Fluoreto	kg	1,58E-05
H2	kg	3,23E-07
Hidrocarbonetos	kg	5,39E-06
Hexano	kg	3,8E-07
Íons metálicos	kg	1,05E-06
Manganês	kg	8,14E-07
Mercúrio	kg	1,68E-09
Metanol	kg	0,0149
Metil acetato	kg	0,00131
N total	kg	2,81E-07
NH3	kg	3,37E-05
Nitrato	kg	3,36E-05
Óleo	kg	9,06E-05
Orgân. dissolvidos	kg	3,99E-06
PAH	kg	2,81E-09
Petróleo	kg	4,67E-06
Sódio	kg	3,94E-06
Sól. dissolvidos	kg	4,46E-05
Sólidos suspensos	kg	0,000136
Subst. Dissolvidas	kg	0,000002
Subst. Suspensas	kg	0,000014
Sulfito	kg	2,52E-06
Zinco	kg	0,000126
Resíduos sólidos		
Escória	kg	1,04E-07
Lodo	kg	0,015
Resíduo aciaria	kg	0,04
Resíduo mineral	kg	1,15E-05
Resíduo não inerte	kg	0,000299
Resíduo sólido	kg	3,85E-05
Aspectos não materiais		
Perda calor (ar)	MJ	0,0563
Perda calor (água)	MJ	0,29
Uso do solo	m2	0,0073

E.6 Cobre

De acordo com BRASIL (1989), o cobre usado no país na década de setenta era todo importado. No ano de 1979 especificamente, o mais antigo para o qual se encontrou dados, a produção brasileira era nula, com importação de 194.500 t. Destas, 190.225

t eram do minério primário, sendo outras 2.326 t de sucata de cobre, 963t de semi-acabados e 986 t de outros produtos.

A origem do cobre em 1988, ano mais antigo para o qual se obteve dados, era predominantemente do Chile, com 40.196 t, seguido do Peru (6.273 t). Uma vez que as importações totais deste ano foram de 59.951 t, o Chile contribuiu com mais de 67%, e desta forma aproximaremos todas as importações de cobre em 1977 para o Chile.

A base de dados utilizada neste caso foi a adaptada por YOKOTE (2003) a partir da desenvolvida pela Universidade de Delft, a *IDEMAT 2001* disponível no SimaPro (PRÉ CONSULTANTS, 2003).

Esta base retrata a produção de cobre a partir de um minério com 0,6% de cobre, o que condiz com o cobre chileno. Representa, segundo os autores (PRE CONSULTANTS, 2003), a produção mundial, com dados médios de diversos produtores coletados entre 1995 e 1999. Inclui a mineração e admite 13% de reciclagem e 98% de recuperação no processo.

Além do minério de cobre são admitidas entradas de óleo cru, gás natural, coque e eletricidade de hidrelétrica. Sobre os insumos, YOKOTE (2003) inclui o transporte ferroviário do minério (50 km) e do coque (100 km).

A Tabela E.32 a seguir apresenta os dados deste insumo.

Tabela E.32- Inventário de ciclo de vida do cobre.

	Unid.	Cobre
		(/ kg cobre)
Consumo de Recursos		
Água	kg	2,81
Argila	kg	1E-06
Bauxita	kg	1,1E-05
Calcita	kg	5,2E-06
Carvão	kg	0,396
Energia (inespec.)	MJ	0,0119
En. Carvão	MJ	0,00026

(continuação)

Tabela E.32- (continuação)

	Unid.	Cobre
		(/ kg cobre)
Consumo de recursos		
En. Gás natural	MJ	0,0691
En. hidrelétrica	MJ	3,32
En. Petróleo	MJ	0,0167
En. Urânio	MJ	0,00026
Gás Natural	kg	0,271
Min. Cobre	kg	0,89
Min. Ferro	kg	5,2E-06
Petróleo	kg	1,6
Sal gema	kg	5,2E-06
Sucata cobre	kg	0,13
Emissões atmosféricas		
1,3 Butadieno	kg	6,7E-08
Amônia	kg	1,6E-06
Benzeno	kg	1E-06
Benzopireno	kg	1,8E-08
CH4	kg	1,2E-06
Chumbo	kg	4,4E-11
CO	kg	0,00306
CO2	kg	7,34
COV-exceto CH4	kg	3,1E-05
F2	kg	5,6E-07
Fluoreteno	kg	1,8E-07
Fuligem	kg	9,9E-05
H2	kg	1,2E-07
H2S	kg	8E-05
Hidrocarbonetos	kg	0,00036
Hidrocarb. Alifát.	kg	9,4E-06
Hidrocarb.Aromát.	kg	2,4E-06
HCl	kg	1,4E-08
Inespec.	kg	7,6E-05
Mercúrio	kg	2,2E-14
Metais pesados	kg	2,6E-08
Metil- mercaptano	kg	3,7E-10
NO2	kg	1,4E-06
NOx	kg	0,0219
Petróleo	kg	4,9E-06
Poeira	kg	6,9E-06
PM10	kg	1,8E-07
SO2	kg	0,672
SOx	kg	2,7E-05
Tolueno	kg	7,7E-07
Xileno	kg	8,3E-07

(continuação)

Tabela E.32- (continuação)

	Unid.	Cobre (/ kg cobre)
Efluentes líquidos		
Ácido (H+)	kg	7,8E-07
Chumbo	kg	3E-08
Cl-	kg	1E-06
Cobre	kg	8,9E-09
DQO	kg	6,7E-08
Fenol	kg	1,4E-09
H2	kg	4,2E-08
Hydrocarbonetos	kg	2E-06
Inorgânicos gerais	kg	2,82
Íons metálicos	kg	1,4E-07
Mercúrio	kg	1,8E-09
N total	kg	3E-07
Óleo	kg	2,3E-07
Orgân. dissolvidos	kg	5,2E-07
PAH	kg	3E-09
Petróleo	kg	6,1E-07
Sódio	kg	5,2E-07
Subst. Dissolvidas	kg	2,6E-07
Subst. Suspensas	kg	1,8E-06
Zinco	kg	2,1E-08
Resíduos sólidos		
Inorgânico geral	kg	134
Escória	kg	1,4E-08
Resíduo mineral	kg	1,5E-06
Resíduo não inerte	kg	3,9E-05
Aspectos não materiais		
Perda calor (ar)	MJ	0,00129
Perda calor (água)	MJ	0,00661
Uso do solo	m2	0,0175