

**UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**AVALIAÇÃO EM EMERGIA DA GERAÇÃO DE  
HIDRELETRICIDADE EM USINAS CONVENCIONAIS  
E MODELO FIO D'ÁGUA: estudo de caso**

**CELSO AURÉLIO TASSINARI**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista - UNIP para obtenção do título de doutor em Engenharia de Produção.

**São Paulo**

**2014**

**UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**AVALIAÇÃO EM EMERGIA DA GERAÇÃO DE  
HIDRELETRICIDADE EM USINAS CONVENCIONAIS  
E MODELO FIO D'ÁGUA: estudo de caso**

**CELSO AURÉLIO TASSINARI**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista - UNIP para obtenção do título de doutor em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra. Silvia Helena Bonilla.

Área de Concentração: Produção mais limpa.

Linha de Pesquisa: Produção mais limpa e Ecologia Industrial

**São Paulo**

**2014**

Tassinari, Celso Aurélio.

Avaliação em emergia da geração de hidreletricidade em usinas convencionais e modelo fio d'água: estudo de caso / Celso Aurélio Tassinari - 2014.

89 f. : il.

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2014.

Área de Concentração: Produção mais limpa.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Silvia Helena Bonilla.

1. Usinas hidrelétricas. 2. Hidreletricidade. 3. Emergia I. Título. II. Bonilla, Silvia Helena (orientadora).

**AVALIAÇÃO EM EMERGIA DA GERAÇÃO DE  
HIDRELETRICIDADE EM USINAS CONVENCIONAIS  
E MODELO FIO D'ÁGUA: estudo de caso**

**CELSO AURÉLIO TASSINARI**

Data de aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_

Prof<sup>a</sup> Orientadora Dra. Silvia Helena Bonilla  
Universidade Paulista - UNIP

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_

Prof. Dr. Pedro Américo Frugoli  
Universidade Paulista – UNIP

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_

Prof<sup>a</sup> Dra. Cecilia Maria Villas Boas Almeida  
Universidade Paulista – UNIP

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_

Prof. Dr. Tibor Raboczky  
Universidade de São Paulo – USP

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_

Prof. Dr. Iranaldo Santos da Silva  
Universidade de São Paulo – USP

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha esposa querida, o grande amor da minha vida, pelo incentivo, força, apoio, companheirismo e cumplicidade em todos os momentos dos últimos 47 anos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela minha vida.

À minha família pelo apoio.

À Prof. Dra. Silvia H. Bonilla, por ter acreditado e pela ajuda, paciência, incentivo, dedicação, disponibilidade, amizade e atenção.

Aos Prof.(s) Dr.(s) Biagio, Cecília e Feni pelas críticas sempre construtivas que me ajudaram a evoluir, aulas, seminários, orientações e contribuições para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Luiz Ghelmandi pela prontidão e ajuda.

A todos os colegas, e aos novos alunos com quem convivi no Laproma, pelo incentivo.

Ao Dr Edval Delbone pela pronta ajuda sempre que solicitado.

Ao Dr Oduvaldo Vendrametto

A Debora Daniel Silva pela ajuda e paciência.

A todos os funcionários do PPGEF por toda ajuda e colaboração

À Comissão de Bolsas da UNIP pela concessão de bolsa de estudo.

À Universidade Paulista - UNIP pela oportunidade da realização do curso.

*“O futuro pertence àqueles  
que acreditam na beleza de  
de seus sonhos”*

*(Eleanor Roosevelt)*

## RESUMO

De acordo com o Plano Nacional de Energia (PNE) para 2030, elaborado, em 2005, pelo Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (EPE), para atender à demanda de eletricidade, deverão ser disponibilizados, até a referida data, mais 164 GW, instalados na forma de Usinas Hidrelétricas (UHEs). Essa forma é responsável por 75% da potência instalada no Brasil. Dois modelos de UHEs têm sido usados na geração; usinas convencionais com reservatório de armazenamento de água e aquelas chamadas modelo fio d'água, que possuem reservatórios menores ou não os possuem. Há muita controvérsia entre os especialistas que atuam na área da geração de energia, quanto ao modelo de UHE que deve ser escolhido nas novas instalações. São citados como aspectos desfavoráveis da instalação de UHEs com reservatório, dentre outros: o deslocamento de pessoas; a perda de vegetação, de área de plantio, de sedimentos; a mudança de perfil dos componentes da vida aquática. Os favoráveis incluem: o armazenamento de energia na forma de água, para enfrentar longos períodos de estiagem; o controle da vazão do rio para evitar alagamentos; a irrigação; a geração de empregos na fase de implantação; turismo; lazer. Segundo alguns especialistas, as UHEs de modelo fio d'água oferecem maior risco de interrupção da geração em períodos longos de falta de chuva. Neste trabalho, pretende-se disponibilizar uma ferramenta de análise dos modelos, sem levar em conta a subjetividade das opiniões, que possa ser útil aos tomadores de decisão sobre as políticas de geração de energia. Aplicando a Contabilidade Ambiental em Energia e a Metodologia de Odum, são quantificados os recursos globais aplicados para a implantação e operação de duas UHEs, uma modelo convencional, com reservatório de 2250 km<sup>2</sup>, e outra, modelo fio d'água, com reservatório de 330 km<sup>2</sup>. Foram escolhidas duas UHEs instaladas no Rio Paraná, administradas pela CESP (Cia Energética de São Paulo), com potências instaladas de valor muito próximo, 1540 MW na convencional e 1550,2 MW na fio d'água. Foi realizado cálculo, em joules de energia solar (seJ), tanto dos recursos globais aplicados, que foram classificados em renováveis (R), não renováveis (N) e provenientes da economia (F), como do produto gerado (a eletricidade). Com base nos valores encontrados, foram calculados, para cada UHE, os índices da Metodologia de Odum e, depois, comparados. Índices que, direta ou indiretamente, dependem da área direta do empreendimento, como fração renovável dos recursos



aplicados; densidade de energia; relação de investimento em energia; relação de rendimento em energia; relação de carga ambiental; índice de sustentabilidade; área indireta necessária; fração renovável dos recursos locais consumidos; e índice de perdas dos recursos locais se mostraram favoráveis à UHE modelo fio d'água. A Metodologia de Odum e a Contabilidade Ambiental em Energia contribuíram para o cálculo dos índices usados numa base científica. O resultado dessa comparação não pode ser analisado de forma isolada, deve ser levado em conta junto com outros fatores decisivos para a escolha, como a pluviosidade do local pretendido para a nova instalação, dentre outros.

**Palavras-chave:** Usinas hidrelétricas; hidreletricidade; energia.

## ABSTRACT

According to National Energy Plan for 2030, which was elaborated in 2005 by the Ministry of Mines and Energy, 164 GW should be made available in the form of hydropower plants in order to attend the demand.

The hydroelectricity is responsible for 75% of the installed power in Brazil. Two types of hydropower plants (HPP), the traditional one with reservoir and the Run-of-River plant have been used for electricity generation. There are controversial opinions on which type of HPP should be selected for the new enterprises. The negative aspects resulted from traditional HPP are displacement of people, vegetation and crop loss, sediment retention and changes in the aquatic biota. The positive aspects include the possibility to face the dry season due to water storage, flooding and flow control, irrigation, tourism and recreational activities. According to experts, the Run-of-River plants have more risks of generation interruption due to lack of rainfall. The present work aims to use the Odum's methodology in order to help the decision and policy makers. All the global resources used in implantation and operation of two HPPs are quantified by means of the emergy accounting. One is a traditional HPP with a reservoir of 2250 km<sup>2</sup> and the other a Run-of-River plant with a small reservoir of 330 km<sup>2</sup>. Both of them deliver similar power values, 1540 MW and 1550,2 MW, respectively. All the Renewable (R), Non-renewable (N) and purchased (F) inputs were calculated and expressed in seJ (solar emergy joules). The indices defined by the methodology were calculated and compared for both HPPs. The influence of the reservoir area was evidenced in some of the indices, such as renewable fraction, emergy density, EIR, ELR, ESI, and indirect area. Although the results are not decisive to take a decision, they can be used in a complementary way with other indicators.

**Keywords:** Hydropower plants; hydroelectricity; emergy.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fluxos anuais de energia e emergia para a UHE Jupiaá .....	51
Tabela 2 – Fluxos anuais de energia e emergia para a UHE PP .....	52
Tabela 3 – Fluxos anuais de emergia agrupados de acordo com a origem e subdivididos e de acordo com a fase em que foram aplicados: implantação (I) ou operação (O). .....	53
Tabela 4 – Distribuição dos fluxos renováveis anuais de emergia .....	54
Tabela 5 – Distribuição dos fluxos não renováveis anuais de emergia de acordo com a origem e a fase de aplicação.....	54
Tabela 6 – Resumo dos fluxos anuais de emergia provenientes da economia com operação e manutenção e sem englobar operação e manutenção.....	56
Tabela 7 – Fluxos totais de emergia, agrupados por origem, englobando e sem englobar os serviços de manutenção e operação.....	57
Tabela 8 – Índices associados à metodologia de Odum (1996) .....	57
Tabela 9 – Índices Mistos.....	61
Tabela 10 – Índices criados pelo autor.....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Usina hidrelétrica de Ourinhos operando no rio Paranapanema.....	15
Figura 2 – Usina hidrelétrica Piraju, operando no rio Paranapanema.....	16
Figura 3 – Vista da UHE Jupιά Fonte Memória da Eletricidade.....	21
Figura 4 – Localização da UHE Jupιά no Estado de São Paulo.....	22
Figura 5 – Vistas da UHE Porto Primavera .....	22
Figura 6 – Localização da UHE Porto Primavera no Estado de São Paulo, em Rosana.....	23
Figura 7 – Mapa de localização das UHEs em estudo.....	23
Figura 8 – Modelo da tabela de quantificação dos fluxos.....	41
Figura 9 – Diagrama de energia do sistema para as UHEs PP e Jupιά.....	50

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração
CANAMBRA	Canambra Engineering Consultants Limited
CESP	Cia Energética de São Paulo
CETESB	Cia. De Tecnologia de Saneamento Ambiental
ED	Densidade em energia
EFM	Pegada Ecológica em energia
EIR	Relação de Investimento em Energia
ELR	Índice de Carga Ambiental
EE	Energia Específica
ESI	Índice de Sustentabilidade
EYR	Relação de Rendimento em Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEAG	Índice de Eficiência da Água de Geração
IEAS	Índice de Eficiência da Água de Suporte
IEAT	Índice de Eficiência da Água de Total
ITE	Índice de Transferência de Energia
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt hora
F	Recursos provenientes da Economia
MW	Megawatt
MWh	Megowatt hora

N	Recursos não renováveis
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PNE	Plano Nacional de Energia
PP	Porto Primavera
R	Recursos renováveis
seJ	joules de energia solar
SIN	Sistema Interligado Nacional
UHE	Usina Hidrelétrica
UHE Jupia	Usina Hidrelétrica Eng. Souza Dias
UHE PP	Usina Hidrelétrica Eng. Sérgio Motta

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>12</b>
1.1	Usinas convencionais (ou com reservatório de acumulação de água).....	14
1.2	O Modelo fio d'água .....	14
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS E METAS.....</b>	<b>19</b>
2.1	Objetivo Geral .....	19
2.2	Objetivos Específicos e Metas .....	19
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
5.1	Coleta de dados.....	37
5.1.1	Ferramenta analítica: energia para a análise, avaliação e mensuração dos resultados .....	38
5.2	Indicadores Calculados no Trabalho .....	42
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>49</b>
5.1	Diagrama.....	49
5.2	Tabelas de Fluxos Anuais de Energia e Emergia .....	50
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DOS FLUXOS DE EMERGIA E ENERGIA.....</b>	<b>71</b>

<b>APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DOS ÍNDICES CALCULADOS E VALORES AUXILIARES .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS DAS UHEs .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE D – SÍMBOLOS USADOS NO DIAGRAMA DA FIGURA 8 .....</b>	<b>89</b>



## 1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme consta do Plano Nacional de Energia – PNE – para 2030, elaborado em 2005 pelo Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética – EPE –, o uso da energia hidráulica não é uma ideia nova. Já na Antiguidade, rodas d'água de madeira foram utilizadas para converter a energia cinética em movimento mecânico, particularmente para o bombeamento de água e moagem de grãos. Contudo, apenas no final do século XIX foi construída a primeira usina hidrelétrica para produção de eletricidade.

A energia elétrica de origem hidráulica está entre as mais utilizadas em todo o mundo. Usinas hidrelétricas são, atualmente, a segunda maior fonte de geração de energia elétrica, representando cerca de 20% de toda a eletricidade gerada no planeta, de acordo com o Banco de Informações de Geração – BIG –, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

A energia hidrelétrica é produzida a partir do aproveitamento do potencial hidráulico de um curso d'água, combinando utilização da vazão do rio, quantidade de água disponível em um determinado período de tempo, com seus desníveis, tanto os naturalmente formados, como as quedas d'água, como aqueles criados com a construção de barragens.

A energia hidráulica provém da irradiação solar e da energia potencial gravitacional. O sol e a força da gravidade condicionam a evaporação, a condensação e a precipitação da água sobre a superfície da Terra. A gravidade faz, ainda, a água fluir ao longo do leito do rio e a esse movimento corresponde uma energia cinética, que pode ser convertida em energia mecânica e esta, em energia elétrica, nas centrais hidrelétricas. A hidreletricidade é, assim, uma forma de energia renovável.

O levantamento e o aproveitamento do potencial hidrelétrico brasileiro tiveram início há mais de um século (por volta de 1880). Os trabalhos, contudo, não eram sistematizados nem tampouco abrangentes.

As primeiras usinas eram de pequeno porte e aproveitavam quedas d'água situadas próximas aos centros urbanos. De acordo com Tolmasquim (2005):

[...] naquela época a tecnologia disponível limitava não só o porte das usinas como também a extensão das linhas de transmissão. Avanços tecnológicos permitiram ganhos expressivos de escala na produção e na transmissão da energia por longas distâncias contribuindo, decisivamente, para a disseminação do uso da energia hidrelétrica no mundo.

Conforme Poulon; Martins (2005), no Brasil, a primeira utilização de energia hidrelétrica ocorreu em 1883, quando foi instalada em Diamantina, Minas Gerais, uma pequena usina com a finalidade de movimentar duas bombas de desmorte hidráulico. Uma linha de transmissão de 2 km levava a energia produzida para as máquinas.

Uma segunda usina foi instalada também em Minas Gerais. Começou a operar em 1887, em Nova Lima, e foi construída pela Compaine des Mines d'Ordu Faria. Como a primeira, essa usina também estava relacionada a trabalhos de mineração. Nesse caso, uma pequena linha de transmissão permitia a iluminação da mina e também das casas dos trabalhadores, que residiam próximo à instalação.

A primeira usina destinada ao serviço público também foi construída em 1885, em Minas Gerais. Trata-se da usina de Marmelos-0, em Juiz de Fora, considerada, à época, como a de maior porte, com seus 625 kW instalados. A energia produzida destinava-se a uma fábrica de tecidos e à iluminação pública da cidade.

Em 1913, teve início o aproveitamento do potencial do rio São Francisco, com a construção da usina de Anjiquinho, nas Cachoeiras de Paulo Afonso

O primeiro grande estudo sistemático, metodologicamente consistente e abrangente sobre o levantamento do potencial hidrelétrico no Brasil, data da década de 60 do século passado. Trata-se dos estudos da Canambra Engineering Consultants Limited, CANAMBRA, sigla pela qual foi identificado e ficou nacionalmente conhecido o consórcio de consultores canadenses, norte-americanos e brasileiros. O consórcio desenvolveu ampla investigação do potencial hidrelétrico do Centro-Sul brasileiro (atuais Regiões Sudeste e parte da Centro-Oeste). O sucesso do estudo foi tal que o escopo dos serviços foi ampliado, abrangendo também a Região Sul.

De acordo com dados da ANEEL, atualmente, a geração de energia elétrica por hidrelétricas é a principal forma usada no Brasil, correspondendo a 75% de toda a potência instalada no país. Em 2005, foi equivalente a 93% da energia elétrica

gerada no Sistema Interligado Nacional (SIN). Esse percentual deve manter-se até o ano de 2030, com a instalação de mais 164 GW prevista no PNE.

A maioria das usinas hidrelétricas (UHEs) segue dois projetos de construção: as usinas convencionais (ou com reservatório de acumulação de água) e aquelas do modelo conhecido como fio d'água.

### **1.1 Usinas convencionais (ou com reservatório de acumulação de água)**

Uma UHE convencional é composta, basicamente, de barragem, sistemas de captação e adução de água, casa de força e comportas. Cada uma dessas partes demanda obras e instalações que devem ser projetadas para um funcionamento conjunto.

A barragem interrompe o curso normal do rio, formando um lago artificial, conhecido como reservatório. As funções da barragem são o armazenamento de água nos períodos de cheias e formação da queda d'água, quando não existe um desnível economicamente favorável.

A água captada no reservatório é levada até a casa de força através de túneis, canais ou condutos metálicos. A casa de força abriga as turbinas. A água conduzida à turbina faz com que esta gire juntamente com um gerador a ela acoplado mecanicamente, transformando a energia cinética em mecânica e esta em eletricidade. Depois de passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio, através do que se convencionou chamar de canal de fuga.

### **1.2 O Modelo fio d'água**

Conforme publicado na Revista Furnas, as UHEs construídas de acordo com o modelo de engenharia conhecido como "fio d'água" têm como característica um pequeno reservatório, ou até mesmo a inexistência do mesmo. Operam praticamente em níveis constantes, admitindo pequenas flutuações devido a requisitos de variação de produção de energia. Não há armazenamento de água para escoamento sazonal, como ocorre nas unidades que operam com reservatórios de acumulação.

Algumas unidades construídas com base nessa tecnologia já estão em operação no Estado de São Paulo. É o caso da UHE de Jupia, um dos objetos deste trabalho.

Há muitas outras do mesmo modelo, como a Hidrelétrica Luiz Carlos Barreto de Carvalho (U.S.L.B.C.), localizada na divisa dos estados de São Paulo e Minas Gerais. Foi a primeira a ser construída de acordo com esse modelo, há 36 anos. A potência instalada é de 1.050 MW e área inundada de 46,70 km<sup>2</sup>.

Em alguns casos, aproveita-se a força da correnteza dos rios sem se estocar a água, como no caso da UHE Ourinhos (Figura 1). Outro exemplo é a UHE Pirajú (Figura 2).

O regime de pluviosidade da região por onde passa o rio até chegar às turbinas é determinante da potência instalada.

As usinas do modelo fio d'água operam com uma capacidade nominal mais estável, já que o nível de operação é praticamente constante, admitindo-se pequenas variações sem que haja alteração de produção.

Figura 1 – Usina hidrelétrica de Ourinhos operando no rio Paranapanema.  
Potência Instalada: 44MW. Área alagada: cerca de 5.095 km<sup>2</sup>.



Fonte: Disponível em: <<http://www2.uol.com.br/debate/1340/regiao/regiao03a.htm>>.

Acesso em: 31 mar. 2010.

Figura 2 – Usina hidrelétrica Piraju, operando no rio Paranapanema.  
Potência Instalada: 80MW. Área inundada:13 km<sup>2</sup>.



Fonte: Disponível em: <<http://dukeenergybr.wordpress.com/tag/piraju/>>. Acesso em: 31 mar. 2010.

Há muita controvérsia entre os especialistas que atuam na área de geração de energia elétrica, sobre as vantagens e desvantagens de cada tipo de UHE, especialmente quando o assunto é a construção de novas unidades, o que está previsto no PNE 2030.

Em matéria publicada no canal temático **Energia**, em 26/02/2010, Roberto Francellino afirma que “a consequência da instalação maciça do modelo fio d’água é a de se ter um parque gerador que exigirá maiores investimentos”. Para Ronaldo Custódio, diretor técnico da Eletrosul Centrais Elétricas S/A.: "Falta coordenação entre os órgãos de meio ambiente do país. Eles só olham o impacto local dos empreendimentos, sem levar em consideração que, se deixarem de construir determinada usina, outra, mais poluente, pode vir a ser necessária".

Jerson Kelman, diretor geral da Agência Nacional de Energia Elétrica-Aneel, destaca que: "Em um rio que tenha uma variação de vazão entre 10 m<sup>3</sup> e 100 m<sup>3</sup> por segundo, se a usina não tem reservatório só faz sentido contar com a menor vazão. Com reservatório talvez se pudesse chegar a uma vazão para cálculo da energia assegurada mais próxima da média". Erik Eduardo Rêgo acrescenta: “Com pouco armazenamento, o país aguenta bem menos tempo uma seca severa”.

Em outra entrevista, datada de 30/09/88, ao *site Alerta em rede*, o presidente da Empresa de Pesquisa Energética - EPE, Maurício Tolmasquim declara que, no Complexo Tapajós, optou-se por excluir o eventual alagamento de áreas indígenas e reservas ambientais com a instalação de usinas sem reservatório. Silveira alerta para o risco do uso do modelo fio d'água em usinas maiores, devido à redução do armazenamento, e recomenda atenção quanto à emissão de CO<sub>2</sub> dos grandes reservatórios. O Gerente de Obras da usina hidrelétrica Santo Antônio, em construção pela Santo Antônio Energia Nelson Caprone considera importante ter cautela na opção pela modalidade, pois "cada caso é um caso". O autor considera que os novos aproveitamentos hidrelétricos, de grande porte, precisam ser minuciosamente avaliados para se calcular até que ponto vale a pena reduzir impacto ambiental por uma hidrelétrica sem lastro.

De acordo com Sperling (2012), "a hidreletricidade, atualmente a mais importante entre as alternativas de energia renovável, limpa e economicamente viável, pode ser o maior benefício de um projeto de desenvolvimento de recursos hídricos".

Entretanto, certamente não é o único. Usinas hidrelétricas integradas em projetos de usos múltiplos da água podem favorecer outras funções de grande importância, como irrigação, abastecimento de água, transporte (hidrovias), controle de cheias, turismo, lazer, dentre outros.

Para a população local, ocorre o aumento do número de empregos durante a construção da UHE, disponibilidade de energia elétrica de baixo custo, bem como uma alternativa em relação à geração em termoelétricas

Sperling afirma ainda que entre os principais impactos estão o deslocamento de pessoas, mudanças na qualidade da água, mudanças na composição da comunidade aquática, perda de patrimônio genético (fauna e flora), desestabilização de encostas e alterações climáticas, incluindo os gases de efeito estufa, a fragmentação do ecossistema rio, que bloqueia a migração dos peixes para as áreas de desova, bem como seu assoreamento em casos nos quais as áreas de captação são grandes.

Os reservatórios podem se tornar um terreno fértil para vetores de diversas doenças destacando-se a malária e a esquistossomose. Os processos de eutrofização podem ser acompanhados pela presença de cianobactérias,

organismos que representam grande preocupação das autoridades de saúde no Brasil, pois foram as responsáveis por diversas mortes no município de Caruaru em 1996.

De acordo com Martins *et al.* (2011) “a regularização do regime de vazões após a construção de Sobradinho minimizou os efeitos das grandes cheias nas regiões à jusante, mas também vêm afetando negativamente atividades tradicionais das populações ribeirinhas, como a pesca, navegação e agricultura”.

Ao contrário da geração termelétrica convencional, em especial a que utiliza carvão, usinas hidrelétricas podem iniciar sua geração ou alterar seu nível de produção muito rapidamente, como no caso das que usam turbinas providas de aletas móveis. Por meio da alteração dos ângulos dessas aletas, pode-se alterar a relação entre o volume de água usado para a geração e o volume que passa de forma livre, sem participar da geração. Isso as qualifica como alternativa especialmente adequada para atender ao repentino aumento diário na demanda de eletricidade dos consumidores (ponta do consumo).

Em relação à produção de eletricidade que se obtém, as UHEs requerem pequena equipe para sua operação e manutenção, apresentando baixo custo de produção, que independe dos preços dos combustíveis. Entretanto, exigem, normalmente, elevado investimento inicial, no qual é determinante o custo do capital.

As UHEs dependem de condições naturais, incertas e imprevisíveis, associadas ao clima, para assegurar um mesmo nível de produção. Praticamente não produzem poluição durante a fase de operação, mas na implantação provocam impactos ambientais.

Neste trabalho, usando a Emergia e a Contabilidade Ambiental em Emergia, serão avaliados os recursos globais envolvidos na construção e operação de duas usinas hidrelétricas construídas no Rio Paraná, uma delas modelo convencional e outra modelo fio d'água. Pretende-se que o trabalho possa ser usado por tomadores de decisão sobre geração da hidreletricidade para auxiliar na avaliação e decisão sobre o tipo de modelo que deve ser construído em cada caso.

## **2 OBJETIVOS E METAS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Efetuar a contabilidade ambiental em energia de dois sistemas diferentes de geração de eletricidade em centrais hidrelétricas situadas no Estado de São Paulo. Um deles é operado com armazenamento de energia por meio de represamento de água (modelo convencional) e o outro não requer a formação de represas (ou requer represas menores) para a operação (modelo fio d'água).

Os sistemas analisados foram escolhidos em função da potência instalada (valores próximos), igual número de turbinas, mesmo leito fluvial e mesmo modelo de administração.

### **2.2 Objetivos Específicos e Metas**

Com base nos valores dos recursos globais quantificados em energia, calcular os índices da Metodologia de Odum.

Verificar se a metodologia contribui para evidenciar as diferenças inerentes às duas tecnologias empregadas para a geração de energia elétrica.

Desenvolver novos indicadores que permitam auxiliar os tomadores de decisão na escolha do modelo mais apropriado para cada situação.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As UHEs estudadas estão localizadas na região mais desenvolvida e populosa do Brasil e são de fundamental importância para a operação do Sistema Interligado Nacional. Pertencem à Cia. Energética de São Paulo – CESP –, que é a maior empresa de produção de energia elétrica do Estado de São Paulo e a terceira do Brasil e da América do Sul. Estão instaladas no rio Paraná. São elas: Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Dias (Jupiá) e Engenheiro Sergio Motta (Porto Primavera).

Como concessionária de serviço público de energia elétrica, a CESP tem suas atividades regulamentadas e fiscalizadas pela ANEEL, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, e opera suas usinas de forma integrada com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

As usinas estudadas neste trabalho foram escolhidas por pertencerem à mesma empresa, possuírem valores de potência instalada muito próximos (1551,2 e 1540 MW), além de estarem instaladas no mesmo leito fluvial.

- **Usina Hidrelétrica Eng. Souza Dias – Jupiá**

Situada na Rodovia Marechal Rondon, km 667 Castilho – SP –, a Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Dias, também conhecida como Jupiá, teve o término de sua construção em 1974. Neste trabalho, passará a ser tratada como UHE Jupiá.

Localizada no Rio Paraná, entre as cidades de Andradina e Castilho (SP) e Três Lagoas (MS), opera com vazão defluente próxima da vazão afluente que caracteriza o modelo fio d'água (ou semifio d'água, como é muitas vezes caracterizada). Possui 14 unidades geradoras com turbinas Kaplan com potência instalada de 1.551,2 MW e dois grupos turbina-gerador, para serviço auxiliar, com potência instalada de 4.750 kW em cada grupo. Sua barragem tem 5.495 m de comprimento e seu reservatório, 330 km<sup>2</sup>. A usina dispõe de eclusa, que possibilita a navegação no Rio Paraná e a integração hidroviária com o Rio Tietê.

As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, a vista da UHE Jupiá e a localização da mesma no Estado de São Paulo.

- **Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (Porto Primavera)**

A Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta é também chamada de Usina Hidrelétrica Porto Primavera e será aqui tratada como UHE PP.

Está localizada no Rio Paraná, em Rosana – SP –, na montante da confluência com o Rio Paranapanema. A construção da mesma foi concluída em 2001.

Sua barragem, a mais extensa do Brasil, tem 10.186,20 m de comprimento, com reservatório de 2.250 km<sup>2</sup> e 1.540 MW de potência instalada. Dispõe de eclusa para navegação no Rio Paraná.

As características das UHEs estão no Apêndice C.

As características cujos valores foram utilizados nos cálculos estão resumidas a seguir:

- Usina Hidrelétrica Eng. Souza Dias – Jupia:
  - Área do espelho d'água: 330 km<sup>2</sup>.
  - Vazão turbinada nominal total: 6.440 m<sup>3</sup>/s.
- Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (Porto Primavera):
  - Área do espelho d'água: 2.250 km<sup>2</sup>.
  - Vazão turbinada nominal total: 7.070 m<sup>3</sup>/s.

Figura 3 – Vista da UHE Jupia Fonte Memória da Eletricidade



Disponível em: <[memoriadaeletricidade.com.br](http://memoriadaeletricidade.com.br)>. Acesso em: 21 nov. 2011.

Figura 4 – Localização da UHE Jupιά no Estado de São Paulo



Fonte: Disponível em: <[pt.wikipedia.org](http://pt.wikipedia.org)>. Acesso em: 21 nov. 2011.

As Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, a vista da UHE Porto Primavera e sua localização no Estado de São Paulo.

Figura 5 – Vistas da UHE Porto Primavera



Fonte: Disponível em: <[rosana.gov.br](http://rosana.gov.br)>. Acesso em: 21 nov. 2011.

Figura 6 – Localização da UHE Porto Primavera no Estado de São Paulo, em Rosana.



Fonte – Wikipédia, a enciclopédia livre <pt.wikipedia.org>. Acesso em 21/11/2011

A Figura 7 mostra a localização das duas UHEs na divisa dos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul.

Figura 7 – Mapa de localização das UHEs em estudo



Fonte: Bacias Hidrográficas Do Brasil. Disponível em: <geoconceicao.blogspot.com>. Acesso em: 21 nov. 2011.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Contabilidade em Emergia foi usada em trabalhos anteriores para avaliar sistemas de geração de eletricidade. Diversas formas de geração foram abordadas, incluindo a hidreletricidade, objeto deste trabalho. Diferentes tópicos foram destacados nos trabalhos e diversos aspectos focados. Em relação à hidreletricidade, a análise dos trabalhos revelou três linhas básicas de abordagem.

Na primeira abordagem, foi considerada a contabilidade em emergia mais tradicional, identificando e quantificando todos os insumos (definidos como todos os recursos necessários para construir a infraestrutura e manter a usina hidrelétrica em operação), a fim de obter a emergia total necessária para gerar eletricidade através de uma UHE. Essa abordagem foi adotada por alguns autores (ULGIATI; BROWN, 2002; BROWN; ULGIATI, 2004). A emergia do principal produto, a energia elétrica, é calculada através da soma dos fluxos de emergia de todos os insumos considerados. A transformidade da eletricidade (gerada pelas plantas estudadas) é calculada dividindo a soma da emergia dos fluxos relacionados pela energia elétrica gerada (expressa em J).

A segunda abordagem é focada nos benefícios (não só da energia elétrica) e nos custos em termos de emergia, derivados da construção da usina hidrelétrica e sua operação. Dessa forma, os benefícios e impactos como consequência da construção da barragem são identificados e quantificados (BROWN; McCLANAHAN, 1996; KANG; PARK, 2002; B. CUL *et al.* 2011). Não só o principal produto (eletricidade) é levado em conta, mas também aqueles gerados indiretamente como consequência. Brown; McClanahan (1996) concluíram que a perda de sedimentos foi o maior impacto, enquanto, dentre os benefícios, a produção de energia elétrica foi o maior, seguido de irrigação. Dentro dessa abordagem, a transformidade da eletricidade hidrelétrica gerada é assumida a partir da literatura. Sempre em contabilidade emergia, mas especialmente quando se trabalha sob essa abordagem, o sistema deve ser bem determinado, a fim de estabelecer com clareza o grau de externalidades positivas e outras consideradas. Além disso, o conceito de benefícios ou custos é plausível de diferentes "leituras", de acordo com a experiência do analista, a pressão sobre o perfil do empreendimento, o interesse das partes envolvidas e os interesses econômicos. Conforme Sperling (2012), em geral, os

benefícios incluem: retorno econômico; benefícios sociais (geração de emprego); serviço de regulação do fluxo do rio, evitando situações perigosas a jusante (enchentes ou falta de água); abastecimento de água; recreação; e pesca. Como impactos negativos, são consideradas, entre outros (SPERLING, 2012), desorganização social; deposição de sedimentos; assoreamento; perda de patrimônio genético; alteração climática e de emissões de gases de efeito estufa.

A decisão sobre a inclusão ou a omissão de um ou mais fluxos para a contabilização da energia depende da extensão do sistema. Numa UHE fio d'água sem reservatório, por exemplo, a alteração climática e a emissão de gases não serão significativas.

A contabilidade em energia é hoje muito adotada como uma metodologia útil e precisa para acessar o uso global de recursos e avaliar impactos ambientais. Tal fato é evidenciado pelo grande número de artigos científicos publicados nos últimos anos. Apesar disso, pode ser considerada hermética para aqueles não iniciados nesta Metodologia.

Esse fato cria barreiras para uma linguagem simples entre os pesquisadores, o governo, os tomadores de decisão e a população como um todo. Para resolver essa limitação, a tradução de termos de energia a conceitos mais acessíveis, como o dinheiro e a área (ODUM, 1996), tornam o conceito mais compreensível para os gestores, atores e decisores.

Na última abordagem, usada por alguns autores para avaliar hidrelétricas por meio da energia, o tema é explorado em termos de uma pegada ecológica modificada em energia (CHENGLONG HE, 2012) e em termos de área de suporte (ULGIATI; BROWN, 2002). No presente trabalho, dois aspectos do recurso água serão abordados, já que o mesmo pode ser considerado a partir de dois pontos de vista, não necessariamente divergentes: a capacidade de geração de energia elétrica devido à energia potencial e seu valor intrínseco, pois a água é um recurso natural vital para o ser humano e para a sobrevivência dos ecossistemas. Reservatórios de água não só representam a capacidade da água em armazenar energia, mas também acarretam o confinamento do recurso, fato que pode levar à falta do mesmo em regiões mais carentes.

A decisão do uso mais importante ou urgente de água e sua distribuição não é trivial e exige uma visão global, para evitar discussão ou visões subjetivas e priorizar objetivamente as necessidades reais. Sua condição de prestadora de serviços ecológicos deve exigir um sistema de gestão de recursos que garanta o fornecimento adequado e sustentável e evite a deterioração dos ecossistemas aquáticos.

Dessa forma, pretende-se, no presente trabalho, tratar a dualidade de funções da água de forma integrada, como fonte de energia hidrelétrica e como recurso insubstituível.

A Contabilidade em Emergia permite essa abordagem interdisciplinar não só para lidar com os dois aspectos citados da água e estabelecer um quadro de decisão científica, bem como colaborar para o desenvolvimento de políticas para o desenvolvimento de planejamento regional.

Pretende-se assim, explorar o uso de emergia para ajudar na tomada de decisão da gestão da água, tendo em conta o papel de "dual" da água. Para esse efeito, foram estudadas duas usinas hidrelétricas localizadas no Brasil, uma considerada uma hidrelétrica convencional e outra com reservatório menor, considerada como semi fio d'água. Além dos indicadores já desenvolvidos na Metodologia de Odum (ODUM, 1996), novos índices são apresentados e discutidos.

Os trabalhos são a seguir apresentados em ordem cronológica.

Para a construção da UHE de Tucuruí, foram analisados por Brown (1986) os bens e serviços necessários. O estudo é baseado na energia incorporada nos combustíveis. São avaliados, ainda, energia incorporada da madeira da floresta, produção primária, solos e sedimentos, que são relacionadas com o rendimento energético do projeto. As energias renováveis de sol e chuva ao longo de toda a bacia são comparadas com a energia gerada.

Inicialmente, os fluxos e armazenamentos são calculados em quantidades reais de energia (cal/ano) e por meio de relações de transformação de energia (ETR) são transformadas em energia incorporada (caloria solar equivalente). Luz solar, chuva e fluxo do rio são as principais energias.



O potencial elétrico da Bacia Amazônica tem sido estimado em 100 milhões de kW. A avaliação dá uma ideia sobre os impactos potenciais de futuros projetos. Em plantas de baixo relevo, onde o trabalho geológico é pequeno, os custos são mais elevados, pois a área do reservatório é maior e a estrutura não beneficia formações geológicas íngremes. Assim, represas com grandes áreas podem gerar quantidades relativamente pequenas de energia.

No trabalho de Brown (1986), uma relação de rendimento foi obtida pela divisão da área pela geração de energia. Em Tucuruí, a relação é 2,4 ha/kW. Empreendimentos com relação menor que 1 devem ser evitados.

Rosa; Schaeffer (1995) usaram o índice GWP para comparar quantitativamente o efeito estufa de diferentes gases. O índice é revisado e generalizado pelos autores e aplicado na forma de um índice alternativo para o caso de emissões de alguns reservatórios de hidrelétricas no Brasil. Concluem os autores que embora o nível de emissões nesses reservatórios esteja longe de ser desprezível, sua contribuição para o efeito estufa é menor, a longo prazo, que aquela relativa à queima de fósseis para geração de eletricidade.

Brown; Maclanaham (1996) usaram a economia da Tailândia e a proposta de construção de duas barragens no rio Mekong para explicar e ilustrar métodos de análise em energia.

Para a Tailândia, a proporção Energia/\$ é próxima da média mundial (3,46 E12 seJ / \$). Sua razão de Energia per capita (2,98 E15 seJ/habitante) é baixa, quando comparada aos países desenvolvidos economicamente (a dos Estados Unidos é 29,3 E15 seJ/habitante). A balança de pagamentos em energia é negativa (a energia nas exportações é quase o dobro da energia em importações). Os índices calculados, como o rendimento líquido das represas propostas, foram sensíveis ao tratamento de sedimentos. Foram obtidas elevadas relações de rendimento líquido (12,3/1 e 20,3/1), se os sedimentos não forem incluídos, mas os valores das relações passaram a ser 1,4/1 e 1,3/1, se houver a inclusão. Se as duas barragens forem construídas como uma cascata, a relação combinada de rendimento líquido é 2,5/1 (sedimentos incluídos).

Energia Líquida, medida como uma relação de rendimento de energia, é a



razão entre o rendimento de um processo em energia para os custos em energia. A proporção é uma medida do quanto um processo irá contribuir para uma economia e, portanto, é um índice de sustentabilidade.

Energia líquida pode ser calculada de fontes de energia, commodities e processos como comércio exterior. Fontes de energia primária normalmente têm taxas de produção na faixa de 5/1 até 15/1. Assim, eles podem contribuir muito para a riqueza de uma economia. Fontes de energia secundárias têm rendimento com índices inferiores a 5/1, mas superiores a 1/1, e produtos de consumo, muitas vezes, têm relações menores que 1/1.

De acordo com Brown; Maclanaham, barragens hidroelétricas geralmente têm altos rendimentos quando os seus custos de construção são comparados com o da eletricidade gerada. Outros benefícios de barragens, como o aumento da irrigação, tornam as barragens ainda mais atraentes. No entanto, a longo prazo, os custos ecológicos não são facilmente computados nos métodos contabilísticos convencionais. No trabalho, os benefícios da irrigação sobre o ambiente se igualam às perdas resultantes de sistemas terrestres sendo inundados. Os rendimentos relativos à grande quantidade de eletricidade gerada são praticamente compensados pela perda de sedimentos e da produtividade a jusante que eles suportam.

Em geral, os benefícios líquidos para as economias de propostas para barragens devem ser avaliados tendo em conta sua contribuição líquida para a maior economia. Provavelmente, se as instalações e barragens presentes forem avaliadas após o fato, e itens como a pesca perdida, os impactos negativos no balanço de nutrientes e o aumento da erosão do solo em áreas circunvizinhas forem incluídos, numerosos projetos de barragens podem ter rendimentos líquidos muito mais baixos.

Há um *trade-off* entre a utilização da energia geopotencial dos rios para gerar eletricidade e, portanto, não a ter espalhando matéria orgânica, nutrientes nem sedimentos na sua parte inferior e no delta.

O *trade-off* parece ser uma energia de alta qualidade para fins urbanos e aplicações industriais, em detrimento das zonas rurais e sistemas ambientais que

dependem da energia geopotencial para distribuir a energia química sobre as planícies aluviais e deltas de rios.

Num estudo da relação entre os serviços ecossistêmicos e os recursos provenientes da economia, realizado em sistemas de tratamento de águas residuais suecas, Geber; Bjørklund (2001) abordam a dificuldade de se comparar a sustentabilidade ecológica de sistemas diferentes. No trabalho, foi analisado o uso de recursos em três diferentes sistemas de tratamento de águas residuais. O objetivo foi investigar em que medida o aumento do espaço e do tempo e a dependência dos serviços dos ecossistemas poderiam substituir os recursos provenientes da economia num determinado empreendimento.

A análise em energia é usada para permitir a comparação de recursos de qualidades diferentes. Os recursos necessários aos tratamentos diferem substancialmente e são convertidos em energia solar. Um índice baseado no uso total de energia por pessoa equivalente (PE) e kg de fósforo foi calculado e apresentou valores semelhantes nos três sistemas. Tal fato reforça a hipótese formulada no estudo de que a energia total é a mesma nos sistemas, embora sejam diferentes os montantes relativos aos recursos da economia à área territorial necessária em cada caso.

No estudo, os recursos da economia não foram totalmente substituídos e um dos tratamentos requereu grande área territorial. O uso da energia expresso em área territorial indireta é obtido dividindo-se o montante em energia requerido da economia em cada tratamento pela energia dos recursos renováveis locais para aquela área. Obtém-se, assim, a área que seria necessária para captar dos recursos naturais locais a energia que veio da economia. Embora a substituição não seja possível na prática, a área indireta passa a ser um parâmetro de comparação entre os empreendimentos.

Kang (2002) usou uma análise de custos e benefícios e o conceito de energia para avaliar a economia da Coreia e os benefícios da proposta de construção de uma barragem. Os valores dos índices daquele país calculados a partir da avaliação em energia foram próximos dos valores dos países desenvolvidos.

Embora o balanço de pagamento tenha sido negativo em 1997, a economia da Coreia mostrou saldo positivo quando os valores de importações e importações

foram expressos em energia. A avaliação mostrou ainda que um grande *stress* ambiental é imposto pela economia ao meio ambiente. Suprimento de água e geração de energia foram as mais importantes contribuições propostas para a construção da represa. O controle do fluxo também contribuiu para a proposta. Os maiores custos associados à construção foram: sedimentos (33,2%), serviços de construção (22,8%) e ruptura social (21,6%). Em termos de energia, a relação benefício custo da proposta foi de 2,78, se os sedimentos não são incluídos, e 1,86, considerando a inclusão, o que mostra benefício em ambos os casos. A relação foi maior que o sistema atual em uso, que é de 1,42 sem a represa, incluindo ou não os sedimentos. O *stress* ambiental da barragem considerada foi mais baixo que o da economia do país, mas a represa pode aumentar o *stress* no meio ambiente local.

Ulgati; Brown (2002) compararam estratégias para colocar de acordo emissões químicas e térmicas geradas em processos de geração de energia. A contabilização dos serviços ambientais requeridos para diluir as emissões é sugerida como um passo em direção à correta avaliação da sustentabilidade dos processos. Os cálculos são aprimorados em muitos estudos de caso por meio da contabilidade em energia. Um indicador baseado em energia diminui 40 a 70%, se é associado ao aumento paralelo de um indicador de perda, quando os serviços ambientais requeridos para diluição dos poluentes são corretamente contabilizados.

Como consequência da inclusão dos serviços ambientais, uma sustentabilidade menor é calculada para cada processo investigado, se comparados com avaliações que não os incluem. A contabilização dos serviços também fornece um meio para avaliar a capacidade de carga do ambiente em relação aos processos conduzidos pelos seres humanos. O requerimento de serviços ambientais para efetivamente reciclar subprodutos em diferentes escalas de tempo e espaço traduz a necessidade de uma área de suporte disponível para o processo em estudo.

Dois áreas de suporte são sugeridas, uma usando limitações locais e a outra considerando limitações globais. A primeira é sugerida como de curto prazo, com capacidade de carga local; a outra é de longo prazo, com capacidade de carga global. O sistema regional contém sistemas ambientais de estocagem dos produtos químicos, do calor e dos subprodutos gerados no processo de produção. Os serviços ambientais requeridos são mostrados como uma interação do sistema

ambiental e subprodutos. Os serviços ambientais podem ser quantificados como a energia renovável para conduzir os processos de diluição. Os serviços ambientais são contabilizados da seguinte forma:

- a) A partir da medida do montante de produtos químicos liberados ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , CO, cinza e hidrocarbonetos não queimados).
- b) Volume e massa de ar requerido para diluir essas emissões até dois níveis de concentração: de acordo com os limites locais ou com Agências de Proteção Ambiental, ou ainda próximas dos valores médios na biosfera.

Considerando o menor limite de concentração e a maior concentração de massa requerida, o valor da energia requerida para os serviços ambientais é determinado pelo cálculo da energia cinética da massa de ar de diluição, usando valores de velocidade do vento na área em questão. Essa energia é a medida da energia do vento necessária para espalhar os poluentes. Quando multiplicada pela transformidade, resulta na energia do vento. Na comparação, são avaliadas estratégias para lidar com as emissões térmicas e químicas dos processos de produção de eletricidade.

Uma das estratégias considera que a Natureza vai cuidar da disposição de resíduos e calor, como sempre faz. Outra estratégia é a da aplicação de recursos, que se revela uma armadilha da entropia. A estratégia de lidar com subprodutos indesejáveis por meio de investimentos adicionais não resolve o problema em grande escala.

A terceira estratégia consiste na contabilização de serviços ambientais e adaptação de desenvolvimento de suas escalas de espaço-tempo.

Seis sistemas de produção de eletricidade são avaliados usando a Energia por Brown; Ulgiati (2002). A relação saída/entrada de energia bem como a relação de rendimento em energia (EYR), a relação de carga ambiental (ELR) tem sido usadas em conjunto para comparar o desempenho dos sistemas.

A geração de  $\text{CO}_2$  é também contabilizada a fim de comparar as fontes renováveis e não renováveis de energia. Os sistemas de produção incluem plantas

usando energia não renovável (gás, petróleo, plantas térmicas a carvão) e as assim chamadas fontes renováveis (geotérmicas, hidroelétricas e eólicas).

O método de avaliação da contribuição ambiental para a geração de energia é mostrado para prover importantes informações que podem ser usadas para apoiar uma sólida política ambiental pública. Plantas de energia renovável foram caracterizadas por altos retornos do investimento, enquanto as fósseis exibiram média de eficiência entre 25 e 36%. O valor do EYR variou desde 7,6/1 para a geração hidrelétrica até 4,2/1 para a térmica a petróleo. As plantas de energia renovável requereram a maior entrada do meio ambiente por unidade de saída, enquanto as plantas de combustíveis fósseis requereram menores recursos ambientais para resfriamento e apoio para a queima do combustível. A carga ambiental foi maior com plantas térmicas. Usando o índice de sustentabilidade em energia, é quantitativamente mostrado como plantas de energia renovável, como eólica, hidrelétrica e geotérmica, apresentaram maior sustentabilidade comparadas com plantas térmicas.

A teoria e o método da emergia são usados por Chen *et al.* (2009) para avaliar a economia da China e a contribuição dos recursos da água dos rios para a riqueza da economia chinesa. O ciclo da água e a conversão de energia são revistas e um método emergia foi desenvolvido para avaliar o valor natural dos recursos da água numa bacia hidrográfica.

Os valores dos índices calculados para a China por esse método são próximos dos valores calculados para países desenvolvidos. Pequeno saldo na balança comercial e perda de emergia líquida em 2002 no comércio exterior são fatos ocorridos. Além disso, a economia, de forma geral, impõe estresse ao meio ambiente e recursos naturais. Diversos índices calculados para os rios chineses, a partir da avaliação em emergia, foram próximos da média global de outros rios.

Cul *et al.* (2010) analisam o Rio Lancang localizado na parte superior do Rio Mekong que tem atraído a atenção mundial pelo desenvolvimento de uma grande hidroelétrica em seu curso principal. Nessa análise, tomando o lago Manwan como um estudo de caso, foi adotado o método da análise em emergia para três índices: rendimento em emergia (EYR), carga ambiental (ELR) e índice de sustentabilidade (EIS).

Os autores visaram analisar a contribuição benéfica da construção e operação do lago para o sistema social regional, a pressão ambiental e a sustentabilidade do ecossistema do rio (área do reservatório e leito rio abaixo). Diferente de pesquisas tradicionais, considera-se a perda dos serviços da natureza no ecossistema terrestre no entorno do reservatório, que é integrado na análise global para análise do efeito ecológico da construção do lago.

Os resultados mostram que cerca de 55% do custo total em energia são referentes à perda de sedimentos. A perda de serviços da natureza no entorno do reservatório atinge 25% do custo. Concluiu-se que não importa se os sedimentos e a perda de serviço são incluídos ou não, o rendimento em energia do ecossistema do rio após a construção é maior que o valor desse índice antes da construção. Isso mostra que a exploração da hidroelétrica tem papel importante na melhoria do rendimento em energia do ecossistema regional. Entretanto a perda de sedimentos e dos serviços no entorno resultaria um aumento de cerca de 45 vezes na pressão ambiental, representando uma perda de sustentabilidade que, expressa pelo índice, atinge mais de 14 vezes.

As conclusões são subestimadas, devido à limitação da disponibilidade de dados. Não é considerada também no estudo a perda de energia do patrimônio e do processo ecológicos bem como do rio.

Reunindo metas ambientais, econômicas e sociais Hayha *et al.* (2011) analisaram uma política de energia que se torna complexa e requer a análise de um arranjo multidisciplinar capaz de explorar as trocas entre as diferentes opções de energias alternativas.

A esse estudo, foram integrados a análise econômica e os métodos de contabilidade biofísica para investigar o desempenho da produção de eletricidade na Finlândia em escala de planta e em âmbito nacional. Custos econômicos e ambientais de tecnologias de geração de energia foram analisados para avaliar características econômicas (custo monetário direto de produção), uso direto e indireto de combustíveis fósseis (custo de geração), impacto ambiental (emissão de CO<sub>2</sub>) e suporte ambiental global (custo em energia).

Três cenários para a energia do futuro na Finlândia em 2025 e 2050 foram

traçados e comparados com o ano de referência 2008. Foram comparados os custos de produção para plantas de calor combinado, à base de uma mistura de biomassa (madeira) e combustíveis fósseis como gás natural, carvão e turfa, eólicas e nucleares, considerando-se um preço permitido de 25 €/t CO<sub>2</sub> emitido. As plantas de gás, carvão e turfa resultaram em 42, 67, 68 e 74 €/MWh, respectivamente. Para as plantas eólica e nuclear, foram calculados custos de produção de 63 e 35 €/MWh. Uma análise de sensibilidade confirmou a competitividade das plantas eólicas, quando o preço permitido de emissão de CO<sub>2</sub> supera 25 €/t CO<sub>2</sub>. As plantas hidrelétrica, eólica e nuclear se caracterizaram pela menor dependência de combustíveis fósseis mostrando um custo de geração de 0,04, 0,13 e 0,26 J/Je e um valor direto e indireto de emissão de CO<sub>2</sub> de 0,01, 0,04 e 0,07 t CO<sub>2</sub>/ MWh.

Wittmann (2010) avalia os impactos ambientais na construção das Hidrelétricas de Tucuruí e Balbinia, ambas situadas na região amazônica. A Emergia e a Contabilidade Ambiental em Emergia são usadas para o cálculo de indicadores relativos à metodologia de Odum. É realizada, ainda, uma análise de custos e benefícios com base na metodologia de Brown; Mcclanaham (1996).

A avaliação da ecoeficiência da conservação da água e de projeto de energia hidrelétrica com base na análise em emergia é realizada por He (2011). São analisados os efeitos positivos e negativos dos projetos de conservação da água e geração hidrelétrica.

Para a análise dos efeitos ecológicos, quantitativamente é proposto um índice de ecoeficiência hidráulica (HEI) para refletir o desempenho do desenvolvimento sua sustentabilidade. Um estudo de caso mostra que, entre os efeitos positivos da conservação de água e engenharia hidrelétrica chinesas, estão a geração de energia, o ajuste de vazão, o suprimento de água para a indústria e irrigação agrícola que correspondem, respectivamente, em porcentagem, a contribuições de 21,3, 26,6, 21,6 e 21,4 em 2008. Tanto o EYR como o HEI mostram uma tendência decrescente, mas o ELR está aumentando.

He (2012) propõe um modelo adaptado de pegada ecológica numa base mista que envolve as teorias de Emergia e Pegada Ecológica. A emergia da capacidade adicional de reservatório é incluída nos recursos naturais renováveis. O objetivo é mostrar uma modificação ecológica de cálculo da pegada para o projeto

hidrelétrico. Os cálculos são comparados com a forma convencional. A mesma conclusão é obtida usando os dois métodos. Conclui-se que o déficit ecológico do projeto hidrelétrico ocorrerá antes do ano equilíbrio previsto. Todavia, o tempo necessário para compensar o déficit ecológico é diferente.

São consideradas melhorias no estudo: a) consideração da energia da capacidade adicional do reservatório; b) uso da densidade em energia da bacia para calcular a capacidade ecológica; e c) montante de pegada ecológica ocupado. (HE, 2012).

Sperling (2012) realizou um balanço dos aspectos ambientais positivos e negativos da construção e operação de reservatórios de hidrelétricas, como: irrigação; abastecimento de água; transporte (hidrovias); aumento da transparência da água; diminuição da turbidez; sedimentação de nutrientes; diminuição dos processos de eutrofização; mudanças na qualidade da água; mudanças na composição da comunidade aquática; perda de patrimônio genético (fauna e flora); e desestabilização de encostas. O desenvolvimento do tema é feito com base na experiência do autor, adquirida por meio da pesquisa e consultoria de projetos desenvolvidos na Universidade Federal de Minas Gerais.

Wu *et al.* (2013) analisam, através de um estudo de caso de larga escala, transformidade em projetos hidrelétricos para desenvolver um modelo de pegada ecológica em energia (EFM). A finalidade é avaliar os efeitos de projetos hidrelétricos no meio ambiente, tanto na fase de construção como na de operação, e demonstrar a importância dos planos de projeto adequados. O estudo de caso escolhido está localizado no noroeste da província de Yunnan, na China. Possui 12 quedas em cascata, com altura total de 276 m e capacidade instalada de 4200 MW. A metodologia desenvolvida no trabalho envolve um modelo de pegada ecológica e sua apropriação em energia. Os autores concluem que, em face da rapidez de desenvolvimento de projetos em larga escala na China, é necessária uma avaliação razoável e sistematizar a construção e operação dos mesmos.

Zang *et al.* (2014) analisaram uma pequena planta hidrelétrica (SHP) na Província de Ghizhou, no sudoeste da China, e compararam os valores dos indicadores calculados (EYR, ELR e ESI) com os valores calculados para duas



UHEs convencionais existentes no Rio Mekong, na Tailândia, uma na Coreia e a Three Georges Dam, na China. Verificaram que o desempenho global ambiental da SHP, analisado à luz dos índices citados, supera o encontrado para as plantas convencionais maiores. Entendem, porém, que o fato não pode ser entendido como um futuro promissor. O regime de operação da planta é muito instável, chegando a ser interrompida por vários meses do ano, durante o período de estiagem.

Uma análise de sensibilidade realizada sobre o efeito de cada entrada de recursos nos índices calculados revelou que a energia geopotencial da água do rio é o fator que mais acarreta mudanças nos valores dos índices calculados. O custo em energia por kWh convertido em moeda revela o valor de equilíbrio de 0,40 CNY/kWh para a comercialização. Porém, o maior preço de mercado atinge 0,23 CNY/kWh, razão pela qual um número significativo dessas plantas espalhadas pela China se encontram à beira da falência.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Coleta de dados

Dados disponíveis no *site* da empresa Centrais Energéticas de São Paulo (CESP) e no *site* do Comitê Brasileiro de Barragens (CDBD) foram utilizados. Outros dados foram coletados em trabalhos publicados (BUENFIL, 2001 e RECH, 2010) e outros autores referenciados no memorial de cálculo. Transformidades e emergias específicas foram obtidas de trabalhos disponíveis na literatura.

Outros dados foram extraídos do Relatório Final O BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2007: Ano Base 2006, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia/EPE – Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. O documento consta do Plano Nacional de Energia elaborado pela Empresa e Energia Elétrica (EPE) do Ministério das Minas e Energia.

Os valores dos fluxos relativos a serviços calculados e apresentados em energia nas Tabelas 1 e 2 representam insumos relativos à fase de operação. Não foram obtidos os valores dos serviços relativos à fase de implantação.

As características específicas, como tipo de vegetação e características físicas ou químicas, também foram obtidas em trabalhos publicados, conforme citações no memorial de cálculo por autores. A base temporal usada foi um ano.

A vazão do rio não foi totalmente considerada no cálculo da energia potencial, apenas a parte que efetivamente gera a eletricidade, ou seja, somente aquela que passa através das turbinas.

Evidências de mudanças drásticas na salinidade, teor de sedimentos e temperatura da água do rio foram considerados como consequência da construção das barragens (MOLISANI, 2006 e MANYARIL, 2007). A energia química da água também fica comprometida a jusante. Neste trabalho, foi considerada a retenção de sedimentos.

Para efeito de cálculo, a presença de biomas nativos foi considerada em 20% da área alagada. Os 80% restantes foram considerados como pastagens naturais. Tal proporção é compatível com as informações de uso da terra disponíveis no

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 1995 (SOUZA, 2005). Para o cálculo da perda de solo e de vegetação, na ausência de dados do relevo, foi considerada a área do espelho d'água no reservatório.

Os valores de evaporação foram extraídos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Os dados são de 2004, não tendo havido atualização dos mesmos. Como o cálculo da energia correspondente resultou num valor não significativo, com porcentagem relativa ao fluxo total menor que 1%, o item não foi considerado no trabalho.

### **5.1.1 Ferramenta analítica: energia para a análise, avaliação e mensuração dos resultados**

Trata-se de uma metodologia desenvolvida por Howard T. Odum (ODUM, 1996) para atender à necessidade de mensuração trazida pelas questões ambientais. H.T. Odum e E.P. Odum deduziram as regras mais importantes dos ecossistemas a partir de medidas do metabolismo sem a necessidade de informações detalhadas de seus componentes. Como desenvolvimento da abordagem de energia incorporada à Ecologia e Engenharia, foi introduzido conceito de energia, definida como "a quantidade de energia disponível de um determinado tipo, geralmente solar, que é direta ou indiretamente necessária para se obter um determinado produto ou para apoiar um dado fluxo". A energia representa toda energia disponível usada no trabalho de confecção de um produto, expressa em unidades de um tipo de energia (ODUM, 1996). A energia é uma medida da atividade de auto-organização do meio circundante. A organização desse meio converge para tornar possível um processo ou produto. É uma medida do serviço ambiental necessário para fornecer um dado recurso.

A unidade de energia é joule de energia solar, abreviada pela sigla seJ.

A Contabilidade Ambiental em Energia é uma evolução dos estudos de Odum (ODUM, 1988 e ODUM, 1996).

Nessa Contabilidade, são considerados todos os insumos, sejam eles serviços da natureza, como solo fértil, luz solar, vento e chuva, sejam serviços humanos, como mão de obra para implantação e manutenção do sistema. Além

desses, os aportes em moeda para aquisição de outros materiais, bem como todos os produtos produzidos desejáveis como a eletricidade, ou não desejáveis como gases de efeito estufa.

A Contabilidade em Emergia foi adotada em outros trabalhos nos quais foram avaliados sistemas similares, como Ulgiati *et al.* (1994), Odum (1996), Brown; McClanahan (1996).

A adoção da emergia para o desenvolvimento deste trabalho permite a avaliação das especificidades do tipo de empreendimento e sua operação (energia, matérias-primas, materiais, produtos acabados e serviços).

Assim, a métrica usada é a emergia (ODUM, 1983), base científica de medição das entradas de energia acumuladas necessárias à produção de um produto ou serviço, calculadas em energia solar como base comum.

Qualquer forma de energia pode ser transformada em calor, mas uma forma de energia não pode substituir outra em todas as situações. Na fotossíntese, por exemplo, não se pode substituir a luz solar por combustível fóssil. É óbvio também que a qualidade que torna um fluxo de energia útil para determinado processo de transformação é perdida com seu uso, tornando-o não reutilizável. Além disso, parte dessa energia é perdida (de acordo com a segunda lei da Termodinâmica) em cada transformação.

Mas, em cada etapa, o fluxo ganha qualidade, já que a energia é menos dispersa. Assim, há uma diminuição da dispersão de energia, quando se passa da ramagem para a madeira que foi originada. O mesmo ocorre quando se passa da madeira para o carvão produzido e também quando este é convertido em eletricidade. Em cada etapa, há uma elevação na quantidade de energia no produto obtido.

A relação do número de joules de energia solar necessários para produzir um joule do produto é chamada transformidade. Quando ocorre uma transformação com diminuição da dispersão, a transformidade aumenta. Assim, essa grandeza passa a ser um indicador de qualidade, pois quantifica a energia incorporada ao produto, considerando a energia total usada para produzi-lo (ULGIATI; BROWN, 2009).

A avaliação das UHEs é feita pela Contabilidade Ambiental em Emergia, método baseado no conceito holístico de sistema. Inclui ferramentas de avaliação que consideram tanto a natureza como a sociedade na qual os humanos estão inseridos. Nesse método, a emergia de todos os insumos necessários é calculada em joules de energia solar (seJ) por meio de fatores de conversão e das chamadas transformidades.

Assim, a luz solar, os combustíveis, a eletricidade produzida, o trabalho humano, o maquinário e os outros insumos utilizados foram colocados em uma base comum e expressos em joules de energia solar.

Na literatura, são encontrados valores dos fatores de conversão para serviços e produtos em diferentes unidades como: emergia por unidade de massa (seJ/g), emergia por unidade de moeda (seJ/US\$). São encontradas também as transformidades que fornecem uma equivalência entre joule de emergia e joule de emergia solar em cada caso. Por exemplo, se para obter um joule de emergia de um produto são necessários 100 joules de emergia solar, a transformidade do produto será 100 joules de emergia solar por joule (seJ/J). A emergia solar é a maior entrada de emergia para a Terra, mas é também a mais dispersa. Define-se com valor 1,0 a transformidade na luz solar absorvida pela Terra.

Em muitas situações, são usados valores de emergia específica expressas em unidade de massa (seJ/kg) que se revelam mais úteis em muitos casos, como no de sólidos. O grau de dispersão física ou química da matéria interfere no valor, já que exige uma aplicação extra de emergia para que se possa diminuí-lo.

A conversão de valores monetários em joules de emergia solar é também usada em muitas situações. Permite que pagamentos monetários de bens e serviços sejam quantificados em seJ e considerados nos cálculos. O valor médio da relação joule de emergia solar/unidade monetária (EMR – Emergy Money Ratio) é obtido dividindo o valor total em emergia usado pela região ou país pelo valor do Produto Interno Bruto daquela região ou país. O EMR considerado foi o do Estado de São Paulo.

Dessa forma, todos os fluxos de entrada, sejam eles da natureza ou da economia, e todos os fluxos de saída são expressos na mesma unidade: seJ (joule

de energia solar).

As transformidades de cada insumo dependem da forma como são produzidos e variam de país para país. Não se trata de uma função de estado já que os valores não dependem somente do estado final e do estado inicial. (MARCHETINI, 2007).

Após definição das “fronteiras do sistema”, foi elaborado um diagrama no qual foram assinalados os fluxos de entrada e de saída, bem como os principais fluxos representativos dos caminhos percorridos pela energia.

Para a quantificação dos fluxos, foram elaboradas as Tabelas conforme modelo da Figura 8, nas quais foram incluídos e calculados todos os fluxos de materiais e energia, convertidos em seJ por meio das transformidades correspondentes. Os fluxos em moeda foram também convertidos por meio da relação energia por unidade de moeda dinheiro (seJ/U\$). Essa relação é obtida, dividindo-se a energia total utilizada pelo Produto Interno Bruto (PIB) da região ou país de um determinado ano.

Figura 8 – Modelo da tabela de quantificação dos fluxos

#	Fluxo		inputs valor bruto	inputs unidade	<u>energia</u> unidade	energia (seJ/ano)	%
	<b>implantação</b>						
1							

Nas Tabelas, os fluxos são divididos, de acordo com a fase em que foram aplicados, se na implantação ou na operação do sistema. São classificados em: renováveis (R), relativo aos produtos e serviços repostos pela natureza dentro do período de tempo fixado no estudo (neste caso, um ano); não renováveis (N), consumidos numa velocidade maior do que aquela com que são repostos; e recursos provenientes da economia (F). Os fluxos de saída incluem o principal produto vendido no mercado (Y), que é o objetivo da construção de uma UHE, a eletricidade. Outros subprodutos indesejáveis e que não podem ser evitados, como as emissões, são também produzidos e lançados ao ambiente (W). Essa classificação torna possível o estabelecimento de índices que podem dar suporte para a avaliação dos sistemas em estudo (ODUM, 1996 e BROWN;

McCLANAHAN,1996), no caso, as UHEs.

Nas linhas das Tabelas, são enumerados os fluxos que atravessam o sistema. A produção do produto é também considerada.

As colunas das Tabelas, são distribuídas de forma a apresentar:

- 1- Referência numérica;
- 2- Discriminação do fluxo;
- 3- Classificação dos recursos em R (renovável), N (não renovável) ou F (proveniente da economia);
- 4- Valores brutos;
- 5- Unidades dos valores brutos;
- 6- O valor da transformidade (ou fator de conversão) aplicada;
- 7- Valores anuais em energia para UHE;
- 8- Porcentagem de participação do fluxo em relação o total de energia.

Nas linhas das Tabelas, são apresentados os fluxos.

A transformação de energia em energia é feita por meio da relação:

$E_m = E \times Tr$  onde:

$E_m$  é a energia do fluxo (em seJ);

$E$  é a energia do fluxo (em J);

$Tr$  é a transformidade (em seJ/J).

Por meio dessa relação, foi calculada a transformidade de cada UHE e foram encontrados os valores constantes da linha 13 de cada Tabela, na coluna de Transformidade.

## 5.2 Indicadores Calculados no Trabalho

Com base nos valores obtidos, índices são calculados para avaliar o uso dos

recursos naturais em relação à produção de eletricidade em cada UHE.

Alguns índices são resultantes dos estudos de Odum(1996). Outros foram desenvolvidos numa tentativa de destacar aspectos específicos deste trabalho.

### **Rendimento em energia**

A relação de rendimento em energia, dada pela energia da eletricidade produzida dividida pela soma das energias dos insumos da economia, é uma medida da contribuição líquida do sistema para a economia (ODUM, 1996). É o retorno do investimento em energia.

$$EYR = Y/F = (F + R + N)/F \quad (1)$$

Sendo a unidade monetária uma métrica limitada para avaliar produtos e serviços da natureza, a relação de rendimento em energia permite uma avaliação mais adequada sobre a viabilidade do processo. A relação fornece uma ideia sobre o benefício líquido para a economia dos vários processos de produção. Quanto maior o valor de EYR, maior fração de fontes de energia disponíveis localmente (R + N) são exploradas por meio do investimento F da economia (BROWN; ULGIATI, 2002).

### **Carga ambiental em energia**

O índice de carga ambiental é um indicador do estresse ambiental causado ao meio ambiente local pela implantação de cada UHE. É calculado dividindo a soma das energias das entradas do sistema econômico (F) e dos recursos não renováveis locais (N) pela energia de entrada renovável local (R). Um alto valor desse índice reflete um alto estresse ambiental e/ou um alto nível tecnológico. Essa relação aumenta quando é empregada alta tecnologia ou quando se empregam poucos recursos renováveis.

$$ELR = (F + N)/R \quad (2)$$

### **Índice de Sustentabilidade**



O índice de sustentabilidade é definido pela relação entre os índices anteriores.

$$ESI = EYR/ELR \quad (3)$$

A determinação dos índices de carga ambiental e de sustentabilidade requer informações sobre os fluxos de recursos renováveis e não renováveis, o que não é considerado no cálculo da relação de rendimento em energia. O conceito de sustentabilidade fica atrelado à maximização de EYR (rendimento) e à minimização de ELR (impacto), ou seja, máximo aproveitamento do investimento econômico com um mínimo de impacto nos recursos locais. O índice mostra se a UHE fornece uma contribuição economicamente apropriada para o usuário em relação à pressão ambiental. Valores de ESI menores que 1 são indicativos de UHEs não sustentáveis a longo prazo. Sistemas com valores maiores que 1 indicam que há contribuições sustentáveis do ponto de vista da economia e da ecologia. Sustentabilidade em médio prazo pode ser caracterizada por um ESI entre 1 e 5. Se a sustentabilidade é de longo prazo, ESI tem valores maiores que 5 (BROWN; ULGIATI, 2002).

### **Relação de Investimento em Energia**

A relação de investimento em energia é calculada pela relação da energia que entra no processo proveniente da economia (F) pela soma da energia total local (renovável e não renovável).

$$EIR = F / (N + R) \quad (4)$$

O índice avalia se o empreendimento ou processo é um bom usuário de energia em relação a outras alternativas.

Quanto menor for o valor de EIR, maior será a apropriação de recursos naturais N e R para gerar produtos com pouca injeção de recursos da economia.

### **Fluxo de energia por unidade de área e tempo (empower density)**

Um sistema organiza sua estrutura e suas funções de acordo com a quantidade e com o tipo de energia disponível. A comparação entre a densidade de

energia em determinada área, em relação aos ecossistemas circundantes, pode indicar o nível de atividade humana na área. Traz também informações sobre a quantidade de energia necessária para manter a estrutura e as funções de determinada área.

A mudança abrupta da densidade energética altera a estrutura e a organização sistema (ODUM, 1996). Esse índice permite comparar a alteração causada pela instalação e operação de cada UHE.

$$ED = Y / \text{área direta} \quad (5)$$

### **Uso da energia expressa em área territorial direta e indireta**

A área indireta é aquela que seria necessária para captar, a partir dos recursos renováveis da região, a energia equivalente aos recursos vindos da economia para a operação do sistema, no caso a UHE. Por meio da relação energia/moeda, o valor dos mesmos é convertido em um montante de energia.

O uso da energia permite a quantificação de todos os recursos usados e permite melhor análise. Posteriormente, o montante de energia é transformado em área territorial (é um valor fictício, já que nunca será levado a termo), fornecendo um critério de comparação do impacto causado pela instalação do empreendimento no ambiente local, medindo a área total de influência do empreendimento na região. (BAKSHI, 2000).

A conversão dos recursos utilizados em área territorial é feita, dividindo-se a energia total dos recursos vindos da economia pela densidade de energia total dos recursos renováveis para aquela área. Os recursos renováveis para a UHE são a chuva e a energia geopotencial do rio, ambos quantificados em densidade de energia por área.

Em relação à energia do rio, para obtenção da densidade por área, deve-se levar em conta a extensão da influência do leito em suas margens, como degradação, áreas alagadas nas cheias e outras perturbações que possam ocorrer nas áreas responsáveis pela oferta de serviços ecológicos. Para o Rio Paraná, não foram encontrados, na literatura, valores ou informações sobre a extensão da influência. Dessa forma, foi utilizado somente o montante de energia da chuva para

calcular a área. Assim, uma demanda de área indireta é calculada por:

$$\text{Área Indireta} = F / EQ_{\text{CHUVA}} \quad (6)$$

Onde  $EQ_{\text{CHUVA}}$  é expresso em seJ/área.

A área direta é aquela ocupada pela instalação de cada UHE (GEBER, 2001). Assim, pode-se comparar a demanda de área territorial direta e indireta das UHEs em estudo.

### **Energia Específica**

A Energia Específica é calculada pela relação entre o valor da energia total que entra no sistema pela energia da eletricidade produzida. Permite obter a quantidade de joules de energia solar (seJ) necessários para produzir cada MWh de energia na UHE.

$$EE = (R+N+F) / MWh \quad (7)$$

#### **5.2.1 Indicadores Desenvolvidos pelo Autor**

##### **Índice de Eficiência da Água de Geração (IEAG)**

É apresentado como o volume de água que passa pela turbina para produzir um MWh de energia em cada caso. Com essa abordagem, o cálculo pode ser feito por meio da expressão:

$$IEAG = \text{VOLUME ÁGUA DE GERAÇÃO} / \text{ELETRICIDADE PRODUZIDA}_{MWh} \quad (8)$$

##### **Índice de Eficiência de Uso da Água de Suporte (IEAS)**

A água de suporte é a quantidade de água que preenche o reservatório e gera o desnível necessário para produzir a energia potencial que será convertida em energia mecânica e, posteriormente, em eletricidade.

Essa quantidade de água fica bloqueada para qualquer outro uso, já que é indispensável para a geração de eletricidade.

O referido índice é calculado por:

$$\text{IEAS} = \text{VOLUME } \text{ÁGUA DE SUPORTE} / \text{ELETRICIDADE PRODUZIDA}_{\text{MWh}} \quad (9)$$

Esse índice mostra eficiência do uso da água de suporte na geração de energia. Quanto maior o índice, menor a eficiência no uso do recurso para a finalidade pretendida.

Leva-se em conta no cálculo que, em Jupuíá, conforme dados da CESP, a renovação desse volume de água se dá a cada 6,9 dias e em PP, a cada 33,9 dias. Dessa forma, considera-se que, em um ano, a renovação ocorra 52,89 vezes em Jupuíá e 10,76 vezes em PP.

### **Índice de Eficiência de Uso da Água Total (IEAT)**

Para a geração da eletricidade na UHE são necessárias tanto a água de suporte como a água de geração. Assim, para o cálculo desse índice, foi considerada a soma do volume anual da água de suporte com o volume anual da água de geração e a quantidade de energia em MWh gerada por ano. É calculado por meio da expressão:

$$\text{IEAS} = \text{VOLUME } \text{ÁGUA TOTAL} / \text{ELETRICIDADE PRODUZIDA}_{\text{MWh}} \quad (10)$$

### **Índice de Transferência de Energia (ITE)**

É dado pela relação entre a energia da água total usada na geração e a energia da eletricidade gerada.. A energia da água total usada é obtida pela soma da energia da água de suporte e a energia da água de geração. Mostra a parcela de energia que é transferida da água total para a produção de eletricidade. É uma medida da eficiência do uso da água para a geração de eletricidade.

Para o cálculo da energia da água de suporte foi considerada a energia química da água, correspondente à qualidade máxima desse recurso termodinamicamente, e a transformidade encontrada em Odum (1996). Para a geração potencial, cuja principal característica é o desnível, foi considerada a energia geopotencial da água (BROWN; McCLANAHAN,1996).

$$\text{ITE} = \text{EMERGIA } \text{ÁGUA TOTAL USADA} / \text{EMERGIA } \text{ELETRICIDADE PRODUZIDA} \quad (11)$$

Foram considerados dois valores: o instantâneo, que leva em conta a água de

suporte mais a água que passa na turbina em 1 segundo (vazão); e a energia da eletricidade produzida no mesmo intervalo de tempo, dada pela potência instalada multiplicada pelo intervalo de tempo considerado e transformada em energia.

O outro valor é anual e considera a energia da parcela de água que mantém a água de suporte nesse período de tempo, levando em conta que em Jupia, conforme dados da CESP, a renovação se dá a cada 6,9 dias e em PP, a cada 33,9 dias. Dessa forma, considera-se que, em um ano, a renovação ocorra 52,89 vezes em Jupia e 10,76 vezes em PP. A outra parcela é a água que passa pela turbina em 1 ano. É considerada também a energia da eletricidade produzida em um ano.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Diagrama

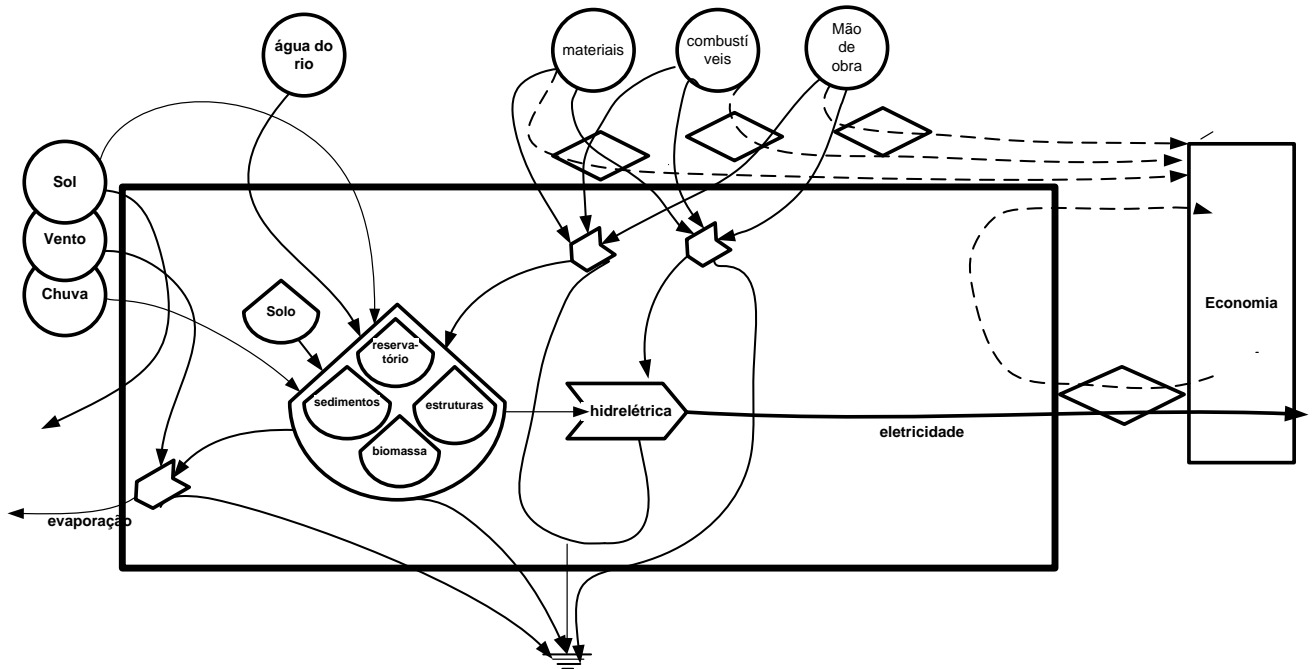
O diagrama de energia para as UHEs PP e Jupirá é apresentado na Figura 8, a fim de estabelecer os limites do sistema e suas interfaces com o ambiente externo (físico, social e econômico). O significado dos símbolos usados no diagrama está no apêndice D.

O diagrama permite também visualizar os fluxos por meio dos quais a energia atravessa o sistema. Dessa forma, determina os dados que são necessários para realizar a contabilidade ambiental, que é o objetivo do presente trabalho.

Os dados brutos obtidos são preferencialmente transformados em unidades tais que permitam posterior transformação em joules de energia e/ou unidades monetários (dólares americanos). Os valores são anuais.

A seguir, por meio das transformidades, são obtidos os valores em energia (seJ). No lado direito do diagrama, são representadas as entradas gratuitas de energia fornecidas pelo meio ambiente, sol, vento e chuva. O recurso não renovável solo foi considerado como um estoque existente dentro das fronteiras do sistema. Em continuação, é indicada a entrada de energia do rio. Depois, estão as entradas de insumos vindos da economia, materiais, combustíveis e mão de obra. Tais recursos, após interagirem entre si, são direcionados em parte para o estoque de recursos que contém a água do reservatório, os sedimentos do rio, as estruturas que foram submersas e a biomassa pré-existente. Outra parte é direcionada para a hidrelétrica da qual resulta a eletricidade produzida. As linhas tracejadas são representativas do intercâmbio de recursos da economia em troca de dinheiro.

Figura 9 – Diagrama de energia do sistema para as UHEs PP e Jupιά



Fonte: Autoria própria

## 6.2 Tabelas de Fluxos Anuais de Energia e Emergia

Nas Tabelas 1 e 2, são apresentados os valores dos fluxos em emergia envolvidos na geração de hidreletricidade em cada UHE.

A fim de facilitar a identificação, tais valores são agrupados de acordo com a fase de aplicação em operação e manutenção. Os serviços relativos à operação e manutenção são apresentados como operação/manutenção. O valor correspondente a PP é cerca de 57% maior que o valor de Jupιά. Os cálculos dos valores constantes das tabelas estão no apêndice A.

A emergia anual total que suporta cada sistema é calculada e apresentada na linha 13 das Tabelas 1 e 2. Valores de Transformidade são calculados e apresentados na mesma linha da tabela. Foram encontrados os valores de  $5,25 \text{ E}+04 \text{ seJ/J}$  para Jupιά e  $8,29 \text{ E}+04 \text{ seJ/J}$  para PP. Os valores são comparáveis ao valor obtido para uma UHE de 85 MW, analisada por Brown; Ulgiati (2002),  $6,24 \text{ E}+04 \text{ seJ/J}$

Tabela 1 – Fluxos anuais de energia e emergia para a UHE Jupia

#	Fluxo		inputs valor bruto	inputs unidade	emergia unidade	emergia (seJ/ano)	%
	<b>implantação</b>						
1	Perda de solo fértil	N	6,40 E+14	J	1,24 E+05 <sup>(1)</sup>	7,94 E+19	3,1
2	Perda de cerrado	N		J		2,00 E+19	
	Perda de pasto	N	1,59 E+15	J	1,26 E+04 <sup>(2)</sup>	4,98 E+19	
	Perda total de vegetação	N	2,81 E+15		1,77 E+04 <sup>(2)</sup>	6,98 E+19	2,7
3	Aço estrutural	F	3,25 E+08	kg	6,97 E+12 <sup>(3)</sup>	2,26 E+19	<1
4	Recursos da economia	F	5,46 E+07	R\$	0,93 E+12 <sup>(4)</sup>	5,08 E+19	2,0
5	Combustíveis	F	9,82 E+12	J	1,13 E+05 <sup>(5)</sup>	1,11 E+18	<1
6	Concreto consumido	F	3,25 E+07	kg	1,81 E+12 <sup>(6)</sup>	5,88 E+19	2,3
	<b>operação</b>						
7	Energia da água da chuva	R	2,96 E+15	J	3,12 E+04 <sup>(7)</sup>	9,23 E+19	3,6
8	Energia geopotencial da água do rio	R	4,23 E+16	J	3,95 E+04 <sup>(8)</sup>	1,67 E+21	65,0
9	Energia do sol	R	2,05 E+18	J	1,00	2,05 E+18	-
10	Perda de sedimentos	N	2,06 E+14	J	6,30 E+04 <sup>(9)</sup>	1,30 E+19	<1
11	Operação/manutenção	F	5,43 E+08	R\$	0,93 E+12 <sup>(10)</sup>	5,05 E+20	19,6
12	Emergia Total					2,56 E+21	
13	Produção de Energia		4,89 E+16	J	<b>5,25 E+04</b>	2,56 E+21	

Fonte: Autoria Própria.

Valores de transformidades retirados da literatura conforme citações dos autores abaixo.

(1) Odum (2000) (2) Pereira (2008) (3) Brown; Buranakarn (2003) (4),(10) Cutrim (2011) (5) Bastianoni *et al.* (2009) (6) Pulselli *et al.* (2007) (7) Odum (1996) (8),(9) Brown; McClanahan (1996)

Para a UHE Jupia, o cálculo das porcentagens de participação dos recursos aplicados na fase de implantação e na fase de operação revela os valores 11% e 89%, respectivamente. Isso mostra que, dentro das condições de elaboração deste trabalho, em termos de aporte de recursos, a fase de implantação é bem menos significativa que a fase de operação. Na fase de implantação, os recursos não renováveis correspondem a 53% do total aplicado naquela fase.



Tabela 2 – Fluxos anuais de energia e emergia para a UHE PP

#	fluxo		inputs valor bruto	inputs unidade	energia unidade	emergia (seJ/ano)	%
	<b>implantação</b>						
1	Perda de solo fértil	N	4,36 E+15	J	1,24 E+05 <sup>(1)</sup>	5,41 E+20	13,4
2	Perda de cerrado	N	1,27 E+16	J	1,33 E+04 (2)	1,69 E+20	12,6
	Perda de pasto	N	1,92 E+16	J	1,77 E+04 (2)	3,40 E+20	
	Perda total de vegetação	N				5,09 E+20	
3	Aço estrutural	F	5,30 E+06	kg	6,97 E+12 <sup>(3)</sup>	3,69 E+19	<1
4	Recursos da economia	F	5,42 E+07	R\$	0,93 E+12 <sup>(4)</sup>	5,04 E+19	1,2
5	Combustíveis	F	3,55 E+13	J	1,13 E+05 <sup>(5)</sup>	4,00 E+18	<1
6	Concreto consumido	F	5,30 E+07	kg	1,81 E+12 <sup>(6)</sup>	9,59 E+19	2,4
	<b>operação</b>						
7	Energia da água da chuva	R	2,96 E+15	J	3,12 E+04 <sup>(7)</sup>	9,23 E+19	3,6
8	Energia geopotencial da água do rio	R	4,13 E+16	J	3,95 E+04 <sup>(8)</sup>	1,63 E+21	40,4
9	Energia do sol	R	1,41 E+19	J	1,00	1,41 E+19	-
10	Perda de sedimentos	N	2,75 E+14	J	6,30 E+04 <sup>(9)</sup>	1,73 E+19	<1
11	Operação/manutenção	F	5,39 E+08	R\$	0,93 E+12 <sup>(10)</sup>	5,01 E+20	12,4
12	Energia Total					4,03 E+21	
13	Produção de Energia		4,86 E+16		<b>8,29 E+04</b>	4,03 E+21	

Fonte: Autoria Própria.

Valores de transformidades retirados da literatura conforme citações dos autores abaixo.

(1) Odum (2000) (2) Pereira (2008) (3) Brown; Buranakarn (2003) (4),(10) Cutrim (2011) (5) Bastianoni *et al.* (2009) (6) Pulselli *et al.* (2007) (7) Odum (1996) (8),(9) Brown; McClanahan (1996)

Para a UHE PP, a distribuição porcentual dos recursos totais em implantação e operação revela os valores 30% e 70%, respectivamente, mostrando que, dentro das condições de elaboração deste trabalho, também nesse caso, a fase de implantação é menos significativa que a fase de operação, em termos de aporte de recursos. Na fase de implantação, os recursos não renováveis correspondem a 85% do total aplicado nessa fase. A porcentagem de participação é maior que a calculada para Jupia (53%) pelo fato de que os recursos envolvidos (perda de solo fértil e perda de vegetação) dependem da área do empreendimento, que é maior em PP.

### Resumo dos fluxos anuais de emergia

Na Tabela 3, há os valores totais dos fluxos de energia agrupados em Renováveis (R), Não Renováveis (N), vindos da Economia (F) e o valor total de energia envolvido no processo. Em cada grupo, foram ainda subdivididos de acordo com a fase em que foram aplicados: implantação (I) e operação (O). As porcentagens de participação de cada tipo de fluxo e em relação ao valor total estão na coluna correspondente. São apresentados os valores relativos a cada UHE.

Tabela 3 – Fluxos anuais de energia agrupados de acordo com a origem e subdivididos e de acordo com a fase em que foram aplicados: implantação (I) ou operação (O).

<b>FLUXOS ANUAIS DE ENERGIA AGRUPADOS</b>					
<b>seJ/ano</b>					
	Fase	PP	%	Jupia	%
Renováveis	I	-	-	-	-
	O	2,25 E+21	55,7	1,76 E+21	68,6
	total	2,25 E+21	55,7	1,76 E+21	68,6
Não Renováveis	I	1,10 E+21	27,2	1,69 E+20	6,6
	O	-	-	-	-
	total	1,10 E+21	27,2	1,69 E+20	
Economia	I	1,87 E+20	4,6	1,33 E+20	5,2
	O	5,01 E+20	12,4	5,05 E+20	19,6
	total	6,28 E+20	17,0	6,38 E+20	24,8
Totais	I	1,29 E+21	31,8	3,00 E+20	11,8
	O	2,75 E+21	68,2	2,26 E+21	88,2
	total	4,04 E+21		2,56 E+21	

Fonte: Autoria própria

Verifica-se que o montante de recursos renováveis é o fluxo de maior valor no processo de geração. São usados na fase de operação do sistema e correspondem à energia da água da chuva e à energia geopotencial da água do rio. Em Jupia, a participação desse fluxo é 13% maior. Tal fato acarreta valor menor de carga ambiental do que o valor para a UHE PP, como será visto na Tabela 7, no cálculo do ELR.

A Tabela 4 fornece a distribuição do valor total, em energia, dos recursos renováveis (R) por tipo de entrada. Note-se que a aplicação de todos os recursos dessa origem ocorre na fase de operação.

Para ambas as UHEs, a energia geopotencial da água do rio é o fluxo de maior valor. Mas é pequena a diferença do valor entre as UHEs. Embora a vazão turbinada de PP seja cerca de 10% maior que a de Jupia, tal diferença é em parte

compensada pela maior queda de referência em Jupuí (cerca de 10%). Quanto à energia da chuva, o valor de PP é 6,6 vezes maior que o de Jupuí, refletindo as diferenças de área dos espelhos dos reservatórios. A pluviosidade de Jupuí tem valor 2% maior que o de PP, mas prevalece a diferença de áreas do espelho.

Tabela 4 – Distribuição dos fluxos renováveis anuais de energia

<b>RENOVÁVEL (R)</b>					
<b>seJ/ano</b>					
	fase	PP	%	Jupuí	%
Energia da água da chuva	O	6,15 E+20	27,4	9,23 E+19	5,2
Energia geopotencial da água do rio	O	1,63 E+21	72,6	1,67 E+21	94,8
Totais	total	2,25 E+21		1,76 E+21	

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5 detalha a distribuição do valor dos recursos não renováveis locais (N), de acordo com sua origem e ainda com a fase de aplicação. Os fluxos não renováveis considerados são: perda de solo fértil; perda da vegetação existente antes da inundação da área para a formação do reservatório; e perda de sedimentos. Os dois primeiros são relativos à fase de implantação. O terceiro ocorre durante a operação.

Tabela 5 – Distribuição dos fluxos não renováveis anuais de energia de acordo com a origem e a fase de aplicação

<b>NÃO RENOVÁVEL (N)</b>					
<b>seJ/ano</b>					
perdas	fase	PP	%	Jupuí	%
solo	I	5,41 E+20	50,6	7,94 E+19	46,9
vegetação	I	5,09 E+20	47,6	6,98 E+19	41,3
sedimentos	O	1,73 E+19	1,6	1,30 E+19	7,7
Totais		1,07 E+21		1,62 E+20	

Fonte: Autoria própria

A perda de sedimentos não se revelou significativa (menor que 1%), enquanto em outros trabalhos de UHEs, como o de Chen *et al.* (2009), atinge participação mais expressiva (9,2% do valor total dos fluxos). Brown; McClanahan (1996)

obtiveram um montante equivalente a 65,3% da energia elétrica total gerada, mas Chenglong (2012) encontrou o equivalente a 0,49% do total de recursos, quando efetuou o cálculo pelo método convencional. Usando o método que combina pegada ecológica e energia, desenvolvido no seu trabalho, o valor encontrado foi 9,28%.

Neste trabalho, o cálculo foi baseado na média das concentrações encontradas em seis medidas efetuadas pela CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Foi considerada retenção total dos sedimentos no reservatório. O baixo valor pode ser decorrente das UHEs instaladas no Rio Paraná, a montante da UHE Jupiaá, em especial a UHE Ilha Solteira, situada a 100 km de distância. Mas há outras nos rios depositários, como a UHE de São Simão, no Rio Paranaíba; as UHEs instaladas no Rio Grande; Marimbondo, Colômbia e Volta Grande e a UHE de Três Irmãos, no Canal Pereira Barreto, nas quais deve ficar retida a maior parte dos sedimentos transportados pelos fluxos de água.

Comparando-se os recursos locais, na UHE PP, o fluxo de Renováveis é mais que o dobro do fluxo de Não Renováveis, enquanto para Jupiaá é cerca de 11 vezes maior. O maior uso de recursos Renováveis implica menor esgotamento de recursos locais dentro da janela de tempo do estudo. Mas levando-se em conta apenas o aporte de recursos renováveis, a contribuição do rio corresponde a 72,6% em PP e 94,8% em Jupiaá.

Nota-se, na Tabela 5, que as perdas de solo e de vegetação representam os maiores valores de energia não renovável em ambas as UHEs. A ordem de grandeza desses dois fluxos é coincidente em cada UHE. Todavia, comparando-se os valores de cada UHE, verifica-se que o total dos fluxos de PP é praticamente sete vezes maior que o de Jupiaá. A diferença é devida às áreas dos espelhos d'água dos reservatórios, que neste trabalho foram consideradas como as áreas do relevo existente antes da formação dos lagos e usadas para os cálculos de perda de solo fértil e de vegetação. O tipo de vegetação submersa em cada caso também apresenta características parcialmente diferentes, contribuindo para a existência da diferença.

A Tabela 6 fornece os valores relativos aos recursos da economia (F) em energia, os quais foram agregados em duas formas, uma incluindo os recursos de operação e manutenção e outra, sem os incluir.

Tabela 6 – Resumo dos fluxos anuais de energia provenientes da economia com operação e manutenção e sem englobar operação e manutenção.

	fase	ECONOMIA (F) com op/man seJ/ano				ECONOMIA (F) sem op/man seJ/ano			
		PP	%	Jupiá	%	PP	%	Jupiá	%
aço	I	3,69 E+19	5,4	2,26 E+19	3,5	3,69 E+19	19,7	2,26 E+19	17,0
recursos	I	5,04 E+19	7,3	5,08 E+19	8,0	5,04 E+19	26,9	5,08 E+19	38,1
combust.	I	4,00 E+18	<1	1,11 E+18	<1	4,00 E+18	2,1	1,11 E+18	<1
concreto	I	9,59 E+19	13,9	5,88 E+19	2,3	9,59 E+19	51,2	5,88 E+19	44,1
op/manut	O	5,01 E+20	72,8	5,05 E+20	79,1	valores não considerados			
Totais		6,88 E+20		6,38 E+20		1,87 E+20		1,33 E+20	

Fonte: Autoria própria

Comparando-se por tipo, verifica-se que não há variação de ordem de grandeza entre os valores correspondentes a cada UHE para cada aporte da economia, considerando ou não os recursos de operação e manutenção. Os recursos de operação e manutenção são os de maior valor, quando considerados, para ambas as UHEs. Se não são considerados, o aporte de recursos para o concreto passa a ser o mais relevante, seguido dos recursos da economia e do aço. Considerando os recursos de operação e manutenção, o valor dos insumos comprados para PP é 66% maior que o de Jupiá. Em ambas as UHEs, o montante de recursos gastos com combustíveis é duas ordens de grandeza menor que a ordem do valor total. A participação é menor que 1% em relação ao valor total e não significativa, quer sejam ou não somados os recursos relativos à operação e manutenção.

A Tabela 7 mostra os recursos totais envolvidos, para cada UHE, agrupados por origem, considerando e sem considerar os serviços de manutenção e operação.

Tabela 7 – Fluxos totais de energia, agrupados por origem, englobando e sem englobar os serviços de manutenção e operação.

			PP	Jupirá	PP	Jupirá
			com serviços		sem serviços	
1	Fluxo de recursos renováveis (seJ/ano)	R	2,25 E+21	1,76 E+21	2,25 E+21	1,76 E+21
2	Fluxo de recursos não renováveis locais. (seJ/ano)	N	1,10 E+21	1,69 E+20	1,10 E+21	1,69 E+20
3	Fluxo de energia da economia (seJ/ano)	F	6,88 E+20	6,38 E+20	1,87 E+20	1,33 E+20
4	Fluxo total de energia (seJ/ano)	Y=R+N+F	4,03 E+21	2,57 E+21	3,53 E+21	2,07 E+21

Fonte: Autoria própria

Embora o tenha sido usado o mesmo critério de cálculo dos serviços relativos a operação e manutenção para ambas UHEs, o fluxo total de energia sofre maior influência para a UHE Jupirá onde fica reduzido a 80% do valor anterior, enquanto em PP passa a ser 88%. O fluxo dos recursos provenientes da economia passa a ser 21% do valor que considera os serviços de operação e manutenção, enquanto para PP fica reduzido a 27% do valor anterior.

Na Tabela 8 são apresentados os valores dos Índices calculados associados à metodologia de Odum (1996), com base nos valores obtidos para os fluxos. Os índices calculados são apresentados para cada UHE, considerando e não considerando os recursos relativos aos serviços de operação e manutenção. Dessa forma, pode-se ter melhor avaliação do peso da participação daqueles recursos em cada empreendimento e nos índices calculados.

Tabela 8 – Índices associados à metodologia de Odum (1996) calculados englobando e sem englobar os serviços de manutenção e operação

			PP	Jupirá	PP	Jupirá
			com serviços		sem serviços	
1	Fração renovável da energia total	R/Y	0,56	0,69	0,64	0,85
2	Densidade de Energia (seJ/km <sup>2</sup> )	Y/área direta	1,79 E+18	7,79 E+18	1,57 E+18	6,27 E+18
3	Relação de investimento em Energia (EIR)	F / (N+R)	0,21	0,33	0,06	0,07
5	Relação de rendimento em energia (EYR)	Y/F	5,87	6,31	21,6	30,3
6	Relação de carga ambiental (ELR)	(N+F)/R	0,79	0,46	0,57	0,17
7	Índice de Sustentabilidade (ESI)	EYR/ELR	7,43	13,71	37,89	178,3
8	Energia Específica (seJ/MWh)	Y/EP	2,98 E+14	1,89 E+14	2,61 E+14	1,52 E+14

Fonte: Autoria própria

Quanto às relações e aos índices calculados, verifica-se que a fração renovável da energia total é 56% para a UHE PP e 69% para Jupia, se os recursos relativos aos serviços de operação e manutenção são considerados. Caso contrário, as frações aumentam para 64% para PP e para 85% para Jupia. Os recursos relativos aos serviços de operação e manutenção, em Jupia, representam 79,1% do valor total de recursos da economia; em PP, 72,8%. Quando esses recursos não são considerados, a maior participação desse insumo em Jupia acarreta maior incremento da fração renovável que em PP.

Como a densidade de energia leva em conta a área direta do empreendimento, Jupia, com área cerca de sete vezes menor, apresenta um valor mais de quatro vezes maior que PP, se considerados os recursos de operação e manutenção. Caso contrário, a proporção praticamente se mantém, sendo que em PP o valor diminui para 88% do valor anterior, enquanto para Jupia é cerca de 20% menor. Todos os valores desse índice para as duas UHEs, com e sem recursos de operação e manutenção, apresentam a mesma ordem de grandeza.

A relação de investimento em energia  $EIR = F / (N+R)$  pode ser expressa como  $1/(EYR - 1)$ , o que permite mostrar que quanto maior for o valor de EYR menor será o valor de EIR, significando maior apropriação de recursos naturais N e R para gerar produtos, com pouca injeção de recursos da economia.

Assim, os valores de EIR encontrados mostram que, em PP, para cada seJ de recursos da economia aplicados, o empreendimento se apropria de 4,76 seJ de recursos naturais locais para produzir a eletricidade, enquanto em Jupia o mesmo recurso da economia permite apropriação de 3 seJ de recursos naturais locais para a produção. Assim, a apropriação de recursos por seJ da economia é maior em PP.

Se não forem considerados os recursos relativos à operação e manutenção, a relação de investimento em energia (EIR) mostra que a apropriação de recursos naturais locais se eleva para 14,3 em Jupia e para 16,6 em PP (16% maior que Jupia).

A relação de rendimento em energia (EYR) pode ser interpretada como uma medida da contribuição do empreendimento para a economia, de acordo com Odum (1996). Os valores elevados refletem o fato de que as fontes naturais geradas em

etapas anteriores são exploradas por uma pequena parcela de recursos vindos da economia.

Para UHEs, Odum (1996) cita o valor 10 para o índice e no trabalho de Brown; Ulgiati (2002) encontra-se o valor 7,65. É importante notar que, embora numa rápida avaliação, altos valores de EYR signifiquem uma situação ideal, isso só é válido se os recursos naturais envolvidos forem de fato renováveis. Apesar de ambas as usinas hidrelétricas poderem ser considerados bons exemplos em termos de EYR (5,87 para PP e 6,31 para Jupιά), a diferença entre os valores, em parte, é resultante da diferença de áreas dos reservatórios.

De forma intencional, duas UHEs com valores próximos de potência instalada e infraestrutura de construção foram selecionadas para este trabalho, a fim de se enaltecerem os efeitos da diferença de área inundada. A metodologia de Odum (1996) parece ser sensível a isso. A UHE PP, se considerados os recursos de operação e manutenção, explora melhor as fontes locais de energia (R + N), ou seja, produz maior quantidade de energia de produtos (no caso, a eletricidade) por unidade de energia aplicada pela economia.

Há que se considerar também que o aporte de recursos da economia (F) é maior para PP devido ao montante de aço estrutural, concreto e também ao valor gasto com combustíveis, os quais são proporcionais ao tamanho da barragem construída.

No trabalho de Brown; Ulgiati (2002), o valor de EYR encontrado para a UHE de 85 MW estudada foi 7,65. Os valores encontrados de 5,87 para PP e 6,31 para Jupιά são bastante próximos ao de Brown (2002).

No trabalho de Brown; McClanaham (1996) sobre as barragens no Rio Mekong, foram encontrados valores de EYR 12,3/1 e 20,3/1, se os sedimentos não forem considerados, e considerando os sedimentos, 1,4/1 e 1,3/1. Porém, o trabalho é baseado em custos e benefícios e o cálculo do EYR é feito pela relação  $EYR = R/(N+F)$ . Tal relação, na Metodologia de Odum (1996), equivale a 1/ELR. No presente trabalho, os sedimentos são considerados e o valor encontrado para ELR foi 0,79 para PP e 0,46 para Jupιά.

Usando a relação de Brown; McClanaham (1996) para o cálculo, os valores



de EYR deste trabalho são respectivamente 1,26/1 e 2,17/1, incluindo os sedimentos.

Mesmo com maior quantidade de recursos renováveis que acarretam uma diminuição da carga ambiental, conforme mostrado na Tabela 3, a UHE PP apresenta ELR 72% maior que Jupia. Isso se deve ao fato que o valor da relação  $(N+F)/R$  é duplamente afetado pelo maior valor de N (6,5 vezes maior) e de F. Em PP, o reservatório com espelho quase sete vezes maior acarretou maior perda de solo fértil e de vegetação pré-existente, causando um total de não renováveis (N) maior que o valor de Jupia. Mesmo assim, os valores encontrados são menores que 2, que é o valor limite para que o empreendimento possa ser considerado de baixo impacto (BROWN; ULGIATI, 1997).

Sendo os recursos relativos à operação e manutenção os maiores valores provenientes da economia, quando os mesmos não são considerados, os rendimentos em energia (EYR) crescem de forma acentuada, acarretando valores não comuns nos índices de sustentabilidade, quando não se consideram os serviços.

O Índice de Sustentabilidade (ESI) de Jupia é cerca de duas vezes o de PP, quando os recursos relativos à operação e manutenção são considerados. A relação passa a ser 4,7 vezes maior, se tais recursos não são considerados, tornando Jupia melhor empreendimento sob o prisma desse índice, já que a influência dos recursos relativos à operação e manutenção é maior para a UHE Jupia. Os valores de ESI encontrados neste trabalho são, a saber: 7,43 para PP e 13,71 para Jupia, portanto, compatíveis com o valor 16,90 encontrado no trabalho de Brown; Ulgiati (2002). As plantas são consideradas de sustentabilidade de longo prazo (BROWN; ULGIATI 1997).

Contudo, da mesma forma que ocorre com EYR, o conceito de bom desempenho em termos de sustentabilidade depende de uma oferta de recursos renováveis reais. Os valores dos índices, como já citado, refletem situações de sustentabilidade a curto, médio e longo prazo, se o ambiente tem capacidade de continuar a fornecer os recursos necessários aos sistemas.

A energia específica na UHE PP revela-se 57% maior que a de Jupia, se os

recursos relativos aos serviços de operação e manutenção são considerados. Mesmo quando não se incluem esses recursos, o valor ainda é 28% maior para PP. A diminuição do valor, quando os recursos relativos à operação e manutenção não são considerados, é de 12,5% para PP e de cerca de 20% para Jupιά.

Na Tabela 9 são apresentados os valores dos Índices mistos calculados. Os índices são calculados em energia, com base nos valores obtidos para os fluxos. Os índices calculados são apresentados para cada UHE, considerando e não considerando os recursos relativos aos serviços de operação e manutenção. Dessa forma, pode-se ter melhor avaliação do peso da participação daqueles recursos em cada empreendimento e nos índices calculados.

Tabela 9 – Índices mistos

			PP	Jupιά	PP	Jupιά
			com serviços		sem serviços	
1	Uso da energia expressa em área indireta (km <sup>2</sup> )	$F/EQ_{\text{chuva}}$	2510	2280	685	475
2	Relação área direta/área indireta	Área direta / Área indireta	0,90	0,14	3,29	0,69
3	Fração renovável dos recursos locais consumidos	$R/(R+N)$	0,67	0,91	0,67	0,91
4	Índice de Perda de Recursos Locais	N / R	0,49	0,10	0,49	0,10
5	Eletricidade produzida por área alagada (MWh/km <sup>2</sup> )	EP/área direta	6,00 E+03	4,12 E+04	6,00 E+03	4,12 E+04

Fonte: Autoria própria

Os montantes de recursos da economia (F) são significativos e bastante similares para ambas as UHEs, acarretando a necessidade de grandes áreas indiretas. Quando os recursos relativos aos serviços de operação e manutenção são considerados, os valores das áreas indiretas são da mesma ordem para ambas as UHEs, sendo apenas 10% maior a área de PP em relação a Jupιά. Mas, no caso de PP, a área indireta necessária é cerca de 10% maior que a área direta e para Jupιά é cerca de sete vezes maior que a própria do empreendimento.

Os valores das áreas indiretas continuam sendo comparáveis, quando não se consideram os recursos relativos aos serviços de operação e manutenção, mas para PP o valor diminui para cerca de 30% da área do empreendimento, ou seja, a área direta do empreendimento é muito maior que aquela que corresponderia ao fornecimento de F pela densidade de energia renovável da região. Desta forma, para PP a área do empreendimento que é 90% da área indireta, praticamente se

igual a à área indireta calculada. Ocorre o inverso para Jupuí, pois a área indireta continua sendo maior que a direta em cerca de duas vezes.

A fração renovável dos recursos locais consumidos é cerca de 35% maior para Jupuí em qualquer base considerada. O maior uso de recursos renováveis acarreta menor quantidade de danos ao ambiente local em curto prazo, já que os recursos são repostos dentro da janela de tempo considerada no estudo.

Considerando o uso de recursos não renováveis, verifica-se na Tabela 5 que PP consome 6,6 vezes mais recursos que Jupuí, sendo ou não considerados os recursos relativos à operação e manutenção. Dessa forma, pode-se concluir que Jupuí tem melhor aproveitamento dos recursos locais, consumindo menos recursos não renováveis.

Jupuí gera praticamente a mesma quantidade de eletricidade com menor área direta. Tal fato acarreta uma série de vantagens adicionais, como menor perda de solo fértil e de vegetação, além de menor perda de patrimônio e menor deslocamento de pessoas. Um índice calculado para Tucuruí por Brown (1986) tem valor de 2,4 ha/kW. Convertendo o índice do presente trabalho para a unidade usada por Brown, encontra-se o valor 0,146 para PP e 0,021 para Jupuí. Embora Brown afirme que valores menores que 1 devem ser evitados, entendemos que há um equívoco nessa afirmação. O correto é o contrário.

Na Tabela 10 são apresentados os índices criados pelo autor.

Tabela 10 - Índices criados pelo autor UHEs

			PP	Jupuí	PP	Jupuí
			com serviços		sem serviços	
1	Índice de eficiência da água de geração (m <sup>3</sup> /MWh)	VOL <sub>AG.GER</sub> / EP MWh	1,49 E+04	1,65 E+04	1,49 E+04	1,65 E+04
2	Índice de eficiência da água de suporte (m <sup>3</sup> /MWh)	VOL <sub>AG SUP</sub> / EP MWh	1,43 E+04	1,59 E+04	1,43 E+04	1,59 E+04
3	Índice de eficiência da água total (m <sup>3</sup> /MWh)	VOL <sub>AG TOT</sub> / EP MWh	2,92 E+04	3,24 E+04	2,92 E+04	3,24 E+04
4	Índice de transferência de energia (seJ água/seJ EP) instantâneo	EM (AG.TOTAL/ EM EP (em 1 s)	6,27 E+07	1,85 E+07	6,27 E+07	1,85 E+07
5	Índice de transferência de energia (seJ água/seJ EP) anual	EM (AG.TOTAL/ EM EP (anual)	46,78	32,63	46,78	32,63

Fonte: Autoria própria

O Índice de Eficiência da Água de Geração (IEAG) mostra que PP para produzir cada MWh gerado gasta 11% mais água que Jupia. Embora a água utilizada não seja perdida, o insumo sofre mudanças em suas propriedades termodinâmicas, como a concentração de sais e nutrientes. Tais mudanças trazem como consequências menor capacidade de realizar serviços ambientais e alteração do perfil da população de peixes que habita o corpo d'água.

Pode-se considerar que, depois de construída a barragem, torna-se necessária uma forma que permita que a água que chega atinja a altura ideal para chegar à cota onde está situada a entrada da turbina. Dessa forma, tudo se passa como se uma quantidade de água ficasse retida para permitir que a água que chega se eleve dentro do reservatório. A essa quantidade de água "presa" foi atribuído o nome "água de suporte". Embora essa "água presa" se renove de tempos em tempos (6,9 dias para Jupia e 33,9 dias para PP, conforme dados da CESP), até que isso ocorra esse volume fica impedido de realizar outros trabalhos ambientais.

Sendo a água um recurso indispensável à vida do nosso planeta e em escassez crescente no mundo, é desejável que cada metro cúbico dessa água bloqueada para outros usos permita a geração da maior quantidade possível de eletricidade, que é o produto dos empreendimentos em estudo. Por meio do Índice de Eficiência da Água de Suporte (IEAS), verifica-se que Jupia apresenta uma eficiência 4% maior que PP nesse índice, sejam ou não os recursos relativos à operação e manutenção considerados.

Pela própria estrutura de cálculo dos índices anteriores, o Índice de Eficiência da Água Total (IEAT) é a soma dos dois índices anteriores, já que para a geração de cada MWh da eletricidade são necessários tanto o volume da água de geração que passa pela turbina como o volume de água de suporte que permite que a água de geração alcance a turbina. Também esse índice mostra que a eficiência em Jupia no uso da água para gerar eletricidade é 11% maior que PP.

O Índice de Transferência de Energia (ITE) avalia a transformação de energia da água em energia de eletricidade produzida. Verifica-se que, de forma instantânea, são necessários  $1,85 \times 10^7$  seJ de energia da água para produzir cada seJ de eletricidade gerada ou produzida em Jupia, ou que são necessários  $6,27 \times 10^7$  seJ de energia da água para produzir cada seJ de eletricidade em PP. Tal fato

é explicado por ser a eletricidade uma forma mais concentrada de energia que a água do rio (ULGIATI; BROWN, 2009).

Como foi visto, a eficiência no uso da água em Jupia é maior do que a de PP para a geração de energia. Assim, para PP, a quantidade de energia da água para gerar 1 seJ de eletricidade é cerca de 3,4 vezes maior. Os valores instantâneos calculados são elevados, pois são tomados como se fosse uma foto do sistema. Em decorrência, considera-se que toda a água de suporte é necessária para produzir a quantidade de energia equivalente à eletricidade gerada em 1 s.

O ITE anual caracteriza melhor a situação por levar em conta a renovação da água de suporte dos sistemas em 1 ano e a energia da eletricidade produzida nesse mesmo período. Os valores passam a ser mais compatíveis (46,78 para PP e 32,63 para Jupia), sendo o valor da relação entre os mesmos (1,43) muito próximo da relação entre as transformidades calculadas das UHEs (1,58).

## 7 CONCLUSÕES

Os valores dos recursos globais calculados mostram que os fluxos de energia renovável são os de maior valor para ambas as UHEs. Em segundo lugar, estão os fluxos não renováveis e, por último, os recursos da economia.

Essa combinação de valores resulta em valores de EYR maiores que 5 e valores de ELR menores que 1, mostrando que os empreendimentos possuem sustentabilidade de longo prazo e contribuem para a economia com baixa carga ambiental nos locais de instalação.

Analisando a densidade de energia, os valores de EIR, EYR, ELR, ESI, a área indireta necessária para cada empreendimento, a fração renovável dos recursos locais consumidos e o índice de perda de recursos locais, verifica-se que todos esses índices apresentam valores mais favoráveis à UHE Jupia em relação à UHE PP.

Os valores dos fluxos de energia renovável, que foram os de maior valor encontrado, são resultantes da soma da energia geopotencial da água do rio, que é praticamente a mesma para ambas as UHEs, com a energia da água da chuva. Apesar de a UHE PP receber maior energia da água da chuva, devido à maior área do espelho, esse fato não foi suficiente para que seus indicadores fossem os de maior valor. Em parte, isso se deve ao fato de que, enquanto para PP os renováveis são maiores em 28%, os não renováveis são 6,6 vezes maiores, prevalecendo essa maior diferença no resultado do cálculo dos índices. Se os serviços de operação e manutenção não são considerados, o valor dos recursos da economia aplicados em PP são 40% maior que os aplicados em Jupia.

Nas relações que permitem o cálculo dos mesmos, nota-se que em todas, direta ou indiretamente, há interferência da área direta do empreendimento que é menor em Jupia. Os diferentes graus de interferência resultam em maior ou menor variação dos índices, mas os melhores valores são sempre os da UHE Jupia.

Assim, neste estudo de caso, com UHEs já construídas e em operação, a maioria dos indicadores mostram vantagens para a UHE de menor área. Mas a energia não abrange todos os enfoques. Não há como levar em conta aspectos

políticos, por exemplo, que têm grande peso na tomada de decisão.

Os dados de pluviosidade disponíveis e usados neste trabalho são históricos, ou seja, correspondem a valores médios coletados ao longo dos últimos anos. Mas os períodos de estiagem são imprevisíveis e tem sido cada vez mais longos como consequência das mudanças climáticas em curso.

Assim, se todos os demais aspectos de importância envolvidos forem considerados e estiverem sob controle, a emergia contribui para a tomada de decisão já que permite quantificar os serviços da natureza envolvidos propiciando uma análise mais justa em relação ao meio ambiente. Além disso, somente nesta metodologia, importantes indicadores de rendimento, carga ambiental, sustentabilidade e transformação em eletricidade dos recursos naturais locais, por meio da aplicação de recursos da economia podem ser quantificados, permitindo um estudo mais detalhado da situação. Cresce a cada dia a importância desses aspectos na definição de políticas públicas e gestão de recursos hídricos. A emergia pode ser aplicada no estudo de outros usos do recurso água mostrando em cada caso, uma avaliação da relação custo benefício, que pode ser usada como uma ferramenta de decisão da melhor aplicação.

A Metodologia de Odum (1996) revela-se, então, uma ferramenta em base científica que permite uma análise justa, que contribui de forma objetiva tanto para a análise deste trabalho como para assuntos relacionados à geração de energia e gestão de recursos hídricos.

Cabe salientar que as condições de contorno escolhidas para a realização deste estudo, como: local de instalação no mesmo leito fluvial, valores próximos de potência instalada, mesmo tipo e número de turbinas e mesma administração impedem que os resultados sejam extrapolados e usados como referência para a tomada de decisão sobre outras UHEs, já que se trata de um estudo de caso. São muitas as variáveis que devem ser analisadas, no caso de novas implantações e nem todas foram levadas em conta aqui. Todavia, mostra quais aspectos devem ser levados em conta na decisão sobre a escolha do tipo de tecnologia e para uma boa gestão de recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

- BAKSHI, Bhavik R. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. **Computers and Chemical Engineering**, n. 24, p. 1767-1773, 2000.
- BASTIANONI, Simoni; CAMPBELL, Daniel E.; RIDOLFI, Rikndi; PULSELLI, Frederico M. The Solar Transformity of petroleum fuels. **Ecological Modeling**, n. 220, p. 40-50, 2009.
- BROWN Mark T.; ULGIATI Sergio. Emergy Evaluations And Environmental Loading Of Electricity Production Systems. **Journal of Cleaner Production**, n.10, p. 321-334, 2002.
- BROWN, Mark T. **Energy analysis of the hydroelectric dam near Tucuruí**. In: ODUM, Howard T.; BROWN, Mark T.; CHRISTIANSON, Robert A. (Eds.), *Energy Systems Overview of the Amazon Basin: Final Report to the Cousteau Society*. Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida, Gainesville, 1986
- BROWN, Mark T.; BURANAKARN, Vorasun. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycles options. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 38, p. 1-22, 2003.
- BROWN, Mark T.; MCCLANAHAN, T. R. Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals. **Ecological Modeling**, n. 91, p. 105 – 130, 1996.
- BROWN, Mark T.; ULGIATI, Sergio. Emergy based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation, **Ecological Engineering**, n.9, p. 51-69, 1997.
- BUENFIL, Andres. **Emergy Evaluation of Water**. Tese (doutorado em Filosofia). Universidade da Flórida, USA, p. 248, 2001.
- CARUSO, C.; CATENACCI, G.; MARCHETTINI, Nadia; PRINCIPI, I.; TIEZZI, Enzo. Emergy based analysis of Italian electricity production system. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetri**, n. 68, p. 265-272, 2001
- CHEN, Dan; CHEN Jing; LUO Zhaohui; LV Zhuwu. Emergy Evaluation Of The Natural Value Of Water Resources In Chinese Rivers. **Environmental Management**, n.44, p.288 – 297, 2009
- COGLEY, J. Graham. The Albedo of Water as a Function of Latitude. **American Meteorological Society**, p. 779, 1979.



CUI, Baoshan; HU, Bo; ZHAI Hongjuan. Employing Three Ratio Indices For Ecological Effect Assessment Of Manwan Dam Construction In The Lancang River, China. **River Research and Applications**, Wiley Online Library, May, 2010.

CUTRIM DEMETRIO, Fernando J. **Avaliação ambiental do Brasil com a contabilidade em emergia**. Tese (doutorado em Engenharia de Produção) Universidade Paulista, UNIP, São Paulo, 167p, 2011

GEBER, Ulrika; BJÖRKLUND, Johanna. The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish waste water treatment systems – a case study. **Ecological Engineering**, Uppsala, n. 18, p.39-59, 2001

HÄYHÄ, Tiina; FRANZESE, Pier Paolo; ULGIATI, Sergio. Economic And Environmental Performance Of Electricity Production In Finland: A Multicriteria Assessment Framework. **Ecological Modeling**, Naples, n. 223, p. 81-90, 2011.

HE, Chenglong. A modified ecological footprint model and its application in hydropower Project. **Advanced Materials Research**, n. 356-360, p. 2349-2357, 2012.

HE, Chenglong. Eco-efficiency evaluation of the water conservancy and hydropower project based on emergy analysis theory. **Multimedia Technology (ICMT)**, Nanjing, p. 4389 – 4393, 2011

KANG, Daeseok; PARK, SeokSoon. Emergy Evaluation Perspectives Of A Multipurpose Dam Propose In Korea, **Journal of Environmental Management**, Coréia, n. 66, p. 293-306, 2002.

MANYARI, Waleska Valença, CARVALHO, Osmar Abilio de. Environmental considerations in energy planning for the Amazon region: Downstream effects of the dams. **Energy Policy**, Rio de Janeiro, n. 35, p. 6326-6354, 2007.

MARCHETTINI, N.; RIDOLFI, R.; RUSTICI, M. An environmental analysis to comparing waste management options an strategies. **Waste management**, Siena, n. 27, p. 562-571, 2007.

MARTINS, Dhiego de M. F.; CHAGAS, Rogério M.; NETO, José de O. Melo; MÉLLO JÚNIOR, Arivaldo V. Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n. 10, Outubro, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011001000010>>. Acesso em: 25/02/2012

MELO, Antônio Carlos Galvão de; DURIGAN, Giselda. Carbon sequestration by planted riparian forests in Paranapanema Valley, SP, Brazil. **Revista Scientia Forestalis**, São Paulo, n. 71, p. 149-154, Agosto, 2006.

MOLISANI, M. M.; KJKERFVE B.; SILVA, A. P.; LACERDA, L. D. Water discharge and sediment load to Sepetiba Bay from an antropogenically-alterad drainage basin, SE Brazil. **Journal of Hydrology**, Fortaleza, n. 33 p.1425-433, 2006.

ODUM Howard T.; BROWN Mark T.; WILLIAMS Sherry Brandt. **Handbook of emergy evaluation: Folio I Introduction and Global Budget**. Gainesville: Center of Environmental Policy, Florida Environmental Engineering Sciences, 1 ed., University of Florida, 2000.

ODUM, Howard T. Energy and environmental decision making. **Environmental accounting**, New York: Wiley & Sons Inc., 1996.

ODUM, Howard T. Self organization, transformity and information. **Science**, n. 242, p. 1132-1139, 1988.

ODUM, Howard T., ODUM, E.C., Energy analysis overview of nations. **International Institute of Applied Systems Analysis**, Luxemburgo, p. WP-83- 82, 1983

PEREIRA Lucas Gonçalves. **Síntese dos métodos de pegada ecológica e análise emergética para diagnóstico da sustentabilidade de países - o brasil como estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas. 2008.

PINHEIRO, Libanio Miranda; HELENE, Paulo; FIGUEIREDO P. R. L. **Estruturas de Concreto Estruturas de Concreto**. São Paulo, EESC Departamento de Engenharia de Estruturas, 1. ed., USP, 2010.

POULON, J.; MARTINS, N. J. Pequenas Centrais Hidrelétricas – Histórico e Perspectivas. **II Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas**, Canela, RS, 2000

PRADO-JATAR, Alejandro; BROWN, Mark T. Interface ecosystems with oil spill in a Venezuelan tropical savannah. **Ecological Engineering**, Los Teques, n. 8, p. 49-78, 1997.

PULSELLI, Riccardo Maria; SIMONCINI, Eugenio; PULSELLI, Federico Maria; BASTIANONI, Simone. Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. **Energy and Buildings**, Siena, n. 39, p. 620-28, 2007.

RECH, Helvio. **A formação do Setor Energético de Mato Grosso do Sul: uma análise à luz da teoria do desenvolvimento de Celso Furtado.** Tese (Doutorado em Energia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, 2010.

**REVISTA FURNAS.** Ano XXXI, n. 317, 2005. Disponível em: <[www.furnas.com.br/](http://www.furnas.com.br/)>. Acesso em 04/04/2010.

ROSA, Luiz Pinguelli, SCHAEFFER, Roberto. Global warming potentials The case of emissions from dams. **Emergy Policy, Rio de Janeiro**, v. 23, n. 2149, p. 58, 1995.

SOUZA, Edevaldo Aparecido. **Reordenamento socioeconômico e cultural das famílias atingidas pela UHE Eng Sérgio Motta. Reassentamento Pedra Bonita e Santa Emília/Santana Brasilândia MS.** Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Planejamento Ambiental). Universidade Estadual Paulista, UNESP, 2005.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Geração de Energia Elétrica no Brasil.** Rio de Janeiro: 1 ed., Interciência, 2005.

ULGIATI, Sergio; BROWN, Mark T. Emergy and Ecosystem. **Complexity Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Napoli, n. 14, p.310-321, 2009.

ULGIATI, Sergio; BROWN, Mark T. Quantifying The Environmental Support For Dilution And Abatement of Process Emissions. The Case Of Electricity Production, **Journal of Cleaner Production**, n.10, p. 335 -348, 2002.

ULGIATI, Sergio; ODUM, Howard T.; BASTIANONI, Simone. Emergy use environmental loading and sustainability. an emergy analysis of Italy. **Ecological Modelling**, Siena, n.73, p.215–268, 1994

VON SPERLING, E. Hydropower in Brazil: overview of positive and negative environmental aspects **Energy Procedia**, Belo Horizonte, n.18, p. 110-118, 2012.

WITTMANN Douglas. **Contribuição para avaliação de impactos ambientais causados pela geração de hidroeletricidade na Amazônia.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Paulista, UNIP, 2010.

WU, JianHua; HE, ChengLong; XU, WeiLin. Emergy Footprint evaluation of hydropower projects. **Science China Technological Sciences**, Nanjing, n. 9, p. 2336-2342, 2013.

ZHANG, Li-Xiao; PANG, Ming-Yue; WANG, Chang-Bo Wang. Emergy Analysis of a

small hydropower plant in southwestern China. **Ecological Indicators**, n. 38, p. 81-88, 2014.

**APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DOS FLUXOS DE EMERGIA E  
ENERGIA**

**(Valores constantes da Tabela 1)**

## UHE Eng. Souza Dias (Jupiá)

### Aço estrutural consumido

Estimado em 10% do concreto aplicado, conforme informações obtidas com engenheiro especialista em projeto de barragens.

Massa de concreto aplicado = volume de concreto consumido x massa específica

Volume consumido: 1.300.000 m<sup>3</sup> Comitê Brasileiro de Barragens\*

Massa específica: 2.500 kg/ m<sup>3</sup> Pinheiro, Helene, Figueiredo (2010)

Massa de concreto aplicado = 1.300.000 m<sup>3</sup> x 2500 Kg/ m<sup>3</sup> = 3,25 E+09 kg

Massa de aço consumido 0,1 x 3,25 E+09/100 ano = 3,25 E+06 kg/ano

Energia específica do aço: 6,97 E+12 seJ/kg Pulselli et al.(2007)

Aço Consumido = 3,25 E+06 kg/ano x 6,97 E+12 seJ/kg / 100 ano =

2,26 E+19 seJ/ano

(Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/site/cadastrobarragens.asp>>. Acesso em: 25 abr. 2010)

### Recursos da economia

Custo anual = Custo total / tempo

(Para cálculo do custo total, foi usado o parâmetro de US\$2.000 / kW

Rech (2010)

Cálculo do custo total = 1551.200 kW x 2000 US\$ / kW = US\$3.10 E+09

Tempo: 100 anos

Custo anual=3,10 E+09 US\$ / 100 ano x 1,7597 R\$ / US\$=5,46 E+07 R\$/ano

EMR = 0,93 E+12 seJ/R\$ Cutrim (2011)

Custo anual=5,46 E+07 R\$/ano x 0,93 E+12seJ/R\$ = 5,08 E+19 seJ/ano

### Combustíveis consumidos

Combustíveis = volume consumido x energia/volume x fator de conversão/tempo

São considerados os combustíveis consumidos para aplicação do concreto, movimentação de solo, enrocamento e escavação. De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens CBDB\* os volumes correspondentes são:

Concreto : 1.300.000 m<sup>3</sup>

Solo : 4.000.000 m<sup>3</sup>

Enrocamento : 2.000.000 m<sup>3</sup>

Escavação : 2.500.000 m<sup>3</sup>

\*Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/site/cadastrobarragens.asp>>. Acesso em: 25 abr. 2010.

Por falta de dados, foram adotados os mesmos consumos usados no trabalho de Brown (1986). Assim, os consumos de cada fase são:

Concreto : 3,4 L/ m<sup>3</sup>

Solo : 3,4 L/ m<sup>3</sup>

Enrocamento : 3,4 L/ m<sup>3</sup>

Escavação : 0,38 L/ m<sup>3</sup>

Cálculo do volume:

Volume = (1.300.000 + 4.000.000 + 2.000.000) x 3,4 + 2.500.000 x 0,38 = 2,57 E+07 L

Volume consumido 2,58+07 L

Energia/volume 9,1 E+03 kcal/L Brown (1986)

Fator de conversão 4.186 J/kcal

Tempo 100 ano

Combustíveis = 2,58 E+07 L x 9,1 E+03 kcal/L x 4.186 J/kcal / 100 ano = 9,82 E+12 J/ano

Transformidade 1,13 E+05 seJ/J Pulselli et al. (2007)

Combustíveis = 9,82 E+12 J/ano x 1,13 E+05 seJ/J = 1,11 E+18 seJ/ano

### Concreto consumido

Massa de concreto aplicado = volume de concreto consumido x massa específica

Volume consumido 1.300.000 m<sup>3</sup> Comitê Brasileiro de Barragens\*

Massa específica 2.500 kg/ m<sup>3</sup> Pinheiro, Helene, Figueireredo (2010)

Massa de concreto cons. = 1.300.000 m<sup>3</sup> x 2500 kg/ m<sup>3</sup> = 3,25 E+09 kg

Energia específica do concreto 1,81 E+12 seJ/kg Pulselli et al.(2007)

Concreto cons.=3,25E+09kgx1,81E+12seJ/kg/100ano=5,88 E+19 seJ / ano

(Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/site/cadastrobarragens.asp>>. Acesso em: 28 nov. 2010).

### Perda de solo fértil

Perda SF = área alagada x profundidade do solo x densidade x porcentagem de matéria orgânica. x energia/massa matéria orgânica. x fator de conversão/tempo

Área alagada (espelho d'água) 330 km<sup>2</sup> CESP\*

Profundidade do solo 3,0 E-01 m Odum (2000)

Densidade 1,43 E+06 g/m<sup>3</sup> Odum (2000)

Matéria orgânica 2% Odum (2000)

Energia/massa de mat.orgânica 5,4 kcal/g Odum (2000)

Tempo 100 ano

Fator de conversão 4186 J/kcal

PerdaSF=330km<sup>2</sup>x1E+06m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>x3,0E-01mx1,43E+06g/m<sup>3</sup>x2E-02x5,4kcal/gx 4186 J/cal/ 100 ano = 6,40 E+14 J/ano

Transformidade =1,24 E+05 seJ/J Odum (2000)

Perda SF = 6,40 E+14 J/ano x 1,24 E+05seJ/J = 7,94 E+19 seJ/ano

\*Disponível em: <[www.cesp.com.br](http://www.cesp.com.br)>. Acesso em: 30 mar. 2012.

### Perda de floresta

Na região considerada a vegetação que existia nos anos 60 era classificada como cerrado com 10,3 t/ha conforme Melo e Durigan (2006). De acordo com Souza, (2005) foi considerada a distribuição de 80% de pasto e 20% de cerrado.

Perda F = massa/área tempo x energia/massa x área alagada

NPP 0,79 kg / m<sup>2</sup> ano Melo e Durigan (2006)

Energia/massa(biomassa) 4000 kcal/kg Pereira (2008)

Área alagada (espelho d'água) 330 km<sup>2</sup> CESP\*

Fator de conversão 4.186 J/kcal

Energia da biomassa = área do sistema (em m<sup>2</sup>) x NPP / fração carbono x 4186 x 4000

Perda relativa ao cerrado= 0,20x330E06x0,79/0,55 x 4186x4000 = 1,59 E+15 J/ano

Transformidade 1,26E+04 seJ/J Pereira (2008)

Perda cerrado = 1,59 E+15J/ano x 1,26 E+04 seJ/J = 2,00 E+19seJ/ano Cálculo análogo para o pasto sendo NPP = 0,35 kg/m<sup>2</sup>ano Pereira (2008)

Perda relativa ao pasto Perda pasto = 0,80x330E+06 x 0,35/0,55 x 4186x4000 = 2,81 E+15 J/ano

Transformidade 1,77E+04 seJ/J Pereira (2008)

Perda pasto = 2,81 E+15x1,77E+04seJ/J = 4,98 E+19 seJ/ano

Perda total = 2,00 E+19 seJ/ano + 4,98 E+19 seJ/ano = 6,98 E +19 seJ/ano

\*Disponível em: <www.cesp.com.br>. Acesso em: 30 mar. 2012.

### Energia geopotencial da chuva

Área (bacia geográfica) 470.000 km<sup>2</sup> CESP\*

Elevação média 365\*\* m

Runoff 1\*\*\* m/ano

Densidade 1 E+3 Kg/ m<sup>3</sup>

Aceleração da gravidade 9,8 m/s<sup>2</sup>

\* \*Disponível em: <www.cesp.com.br>. Acesso em: 30 mar. 2012.

\*\* Por dificuldade na obtenção desta informação, foi adotada a elevação média da cidade.

\*\* Valor adotado

Energia GPC = área x elevação média x densidade x aceleração da gravidade

Energia = 47E+4 km<sup>2</sup> x 1 x E+6 m<sup>2</sup> / km<sup>2</sup> x 365m x 1 m/ano x 1 E+3 x Kg/ m<sup>3</sup> x 9,8 m/s<sup>2</sup> = 1,68 E+18 J/ano

### Energia química da chuva

Energia QC = Precipitação média x Energia Livre de Gibbs x área

Precipitação média 1815,6 mm/ano CPTEC\*

Energia Livre de Gibbs 4,94 E+6 J/m<sup>3</sup> Odum (1996)

Área (reservatório) 330 km<sup>2</sup> CESP\*\*

Energia QC = 1815,6 mm/ano x 1E-3 mm/m x 4,94 E+6 J/m<sup>3</sup> x 330 km<sup>2</sup> x E+6

$$\text{km}^2/\text{m}^2 = 2,96 \text{ E}+15 \text{ J/ano}$$

Transformidade =  $3,12 \text{ E}+04 \text{ seJ/J}$  Odum (1996)

$$\text{Energia QC} = 2,96 \text{ E}+15 \text{ J/ano} \times 3,12 \text{ E}+04 \text{ seJ/J} = 9,23 \text{ E}+19 \text{ seJ/ano}$$

\*CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <[www.cptec.inpe.br](http://www.cptec.inpe.br)>. Acesso em: 12 nov. 2011.

\*\*Disponível em: <[www.cesp.com.br](http://www.cesp.com.br)>. Acesso em: 30 mar. 2012.

## Energia do sol

Energia do Sol = área x insolação média x (1 - albedo)

Área (reservatório)	330	CESP*
Insolação média em (Três Lagoas-MS a 29,2 km)	5,01 E +03 J/s	
Albedo	0,055	Cogley (1979)

\*Disponível em: <[www.cesp.com.br](http://www.cesp.com.br)>. Acesso em: 30 mar. 2012.

A insolação foi obtida no site da CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 12 nov. 2012.

Para o Albedo, foi considerada a média dos valores anuais calculados por Sivkov, S.I. e Grishchenko, D.L., constantes da Tabela 7 página 780 do Volume 107 da American Meteorologica ISociete.

$$\text{Energia do Sol} = 330 \text{ km}^2 \times \text{E}+06 \text{ m}^2 / \text{ km}^2 \times 5,01 \text{ E}+03 \text{ J/s h} \times 3600 \text{ s/h} / \text{ m}^2 \text{ dia} \times 365 \text{ dia/ano} \times (1-0,055) = 2,05 \text{ E}+18 \text{ seJ/ano}$$

## Energia geopotencial do rio

Para cálculo do volume anual foi considerada a vazão turbinada conforme dados da CESP constantes do Apêndice C. O mesmo critério foi usado para a queda vertical.

Energia GPR = vazão x queda vertical x densidade x aceleração da gravidade

Vazão	6.440	m <sup>3</sup> /s	CESP*
Queda vertical	21,30	m	CESP*
Densidade	1 E+03	kg/m <sup>3</sup>	
Aceleração da gravidade	9,8	m/s <sup>2</sup>	

$$\text{Energia GPR} = 6.440 \text{ m}^3/\text{s} \times 3,15 \text{ E}+07 \text{ s/ano} \times 21,30 \text{ m} \times 1 \text{ E}+03 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 4,23 \text{ E}+16 \text{ J}$$

Transformidade =  $2,35 \text{ E}+04 \times 1,68 = 3,95 \text{ E}+04 \text{ seJ/J}$  Brown e McClanahan (1996)

$$\text{Energia GPR} = 4,23 \text{ E}+16 \text{ J} \times 3,95 \text{ E}+04 \text{ seJ/J} = 1,67 \text{ E}+21 \text{ seJ/ano}$$

\*\*Disponível em: <[www.cesp.com.br](http://www.cesp.com.br)>. Acesso em: 30 mar. 2012.

## Operação e manutenção



OpMan = Potência x tempo x custo

OpMan = 1550,2 MW x 365 x 24 h/ano x R\$40 / MWh = 5,43 E+08 R\$/ano

EMR 0,93 E+12 seJ/R\$ Cutrim (2011)

OpMan = 5,43 E+08 x 0,93 E+12 seJ/R\$ = 5,05 E+20 seJ

### Perda de sedimentos

A concentração média foi calculada com base em 6 medições realizadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB no ano de 2009.

Para cálculo do volume anual foi considerada a vazão média (CESP)\*.

Perda de sedimentos (PS) = volume anual x concentração

PS=vazão máxima x tempo x concentração x energia/massa x fator de conversão

Vazão média 6.158 m<sup>3</sup>/s CESP\*

Concentração 47 g/m<sup>3</sup> (CETESB)

Energia/massa 0,0054 kcal/g Brown e McClanahan (1996)

Fator de conversão 4.186 J/kcal

PS = 6.158 m<sup>3</sup>/s x 365x24x3600 s/ano x 47 g/m<sup>3</sup> x 0,0054 kcal/g x 4.186 J/kcal = 2,06 E+14 J

Transformidade 6,30 E+04 seJ/J Brown e McClanahan (1996)

Energia = 2,06 E+14 J x 6.30 E+4 = 1,30 E+19 seJ/ano

\*Disponível em: <www.cesp.com.br>. Acesso em: 30 mar. 2012.

### Evaporação

Massa evaporada = área x volume/área.ano

Massa evaporada = 330 E+06 m<sup>2</sup> x 521 L/m<sup>2</sup> x m<sup>3</sup> / 1000 L = 1,72 E+08 m<sup>3</sup>

Transformidade 2,46 E+10 x 1,68 = 4,13 E+10 seJ/m<sup>3</sup> Buenfil (2001)

Energia = 1,72 E+08 m<sup>3</sup> x 4,13 E+10 seJ/m<sup>3</sup> = 7,10 E 18 seJ

### Eletricidade produzida (Energia Gerada)

Energia Gerada = Potência x tempo

Potência instalada 1550,2 MW CESP\*

Energia Gerada = 1550,2 x 8.760 h/ano = 1,36 E + 07 MWh/ano

Energia Gerada = 1550,2 E+6 x 8.760 h/ano x 3600 s/h = 4,89 E+16 J/ano

Energia Gerada x transformidade = 4,89E+16 x 5,16E+04 = 2,57 E+21 seJ/ano

\*Disponível em: <www.cesp.com.br>. Acesso em: 30 mar. 2012.

### UHE Eng. Sérgio Motta (Porto Primavera)

#### Valores constantes da Tabela 2

#### Aço estrutural consumido

Estimado em 10% do concreto aplicado conforme informações obtidas com

engenheiro especialista em projeto de barragens.

Massa de concreto aplicado = volume de concreto consumido x massa específica  
Estimado em 10% do concreto aplicado conforme informações obtidas com engenheiro especialista em projeto de barragens.

Massa de concreto aplicado = volume de concreto consumido x massa específica

Volume consumido: 2.119.533 m<sup>3</sup> Comitê Brasileiro de Barragens\*

Massa específica: 2.500 kg/ m<sup>3</sup> Pinheiro, Helene, Figueiredo (2010)

Massa de concreto aplicado = 2.119.533 m<sup>3</sup> x 2500 kg/ m<sup>3</sup> = 5,30 E+09 kg

Massa de aço consumido 0,1 x 5,30 E+09 = 5.30 E+08 kg

Energia específica do aço: 6,97 E+12 seJ/kg Pulselli et al. (2007)

Aço Consumido 5,30 E+08 kg x 6,97 E+12 seJ/kg / 100 ano = 3,69 E+19 seJ/ano

\*Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/site/cadastrobarragens.asp>>. Acesso em: 25 abr. 2010.

### Recursos da economia

Custo anual = Custo total / tempo (Para cálculo do custo total foi usado o parâmetro de US\$2.000 / kW Rech ( 2010)

Cálculo do custo total = 1540.000 kW x 2000 US\$ / kW = US\$ 3,08 E+09

Custo total 3,10 E+09 US\$

Tempo 100 ano

Custo anual=3,08 E+09 US\$/100 anos x 1,7597 R\$/US\$= 5,42 E+07

EMR = 0,93 E+12 seJ/R\$ Cutrim (2011)

Custo anual=5,42 E+07 R\$/ano x 0,93 E+12 seJ/R\$ = 5,04 E+19 seJ/ano

### Combustíveis consumidos

Combustíveis = volume consumido x energia/volume x fator de conversão/tempo

São considerados os combustíveis consumidos para aplicação do concreto, movimentação de solo e enrocamento e escavação. De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens\* CBDB os volumes correspondentes são:

Concreto : 2.119.533 m<sup>3</sup>

Solo : 23.580.951 m<sup>3</sup>

Enrocamento : 50.474 m<sup>3</sup>

Escavação : 14.421.006 m<sup>3</sup>

Por falta de dados, foram adotados os mesmos consumos usados no trabalho de BROWN 1986 para Assim, os consumos de cada fase são:

Concreto : 3,4 L/ m<sup>3</sup>

Solo : 3,4 L/ m<sup>3</sup>

Enrocamento : 3,4 L/ m<sup>3</sup>

Escavação : 0,38 L/ m<sup>3</sup>

Cálculo do volume:

Volume = (2.119.533 + 23.580.951 + 50.474) x 3,4 + 14.421.006 x 0,38 = 9,30 E+7 L

Energia/volume	9,1 E+03	kcal/L	Brown (1986)
Fator de conversão	4.186	J/kcal	
Tempo	100	ano	
Combustíveis = 9,30 E+7 L x 9,1 E+03 kcal/L x 4.186 J/kcal / 100 ano = 3,55 = E+13 J/ano			
Transformidade	1,13 E+05	seJ/J	Bastianoni et al. (2009)
Combustíveis = 3,55 E+13 J/ano x 1,13 E+05 seJ/J = 4,00 E+18 seJ/ano			

\*Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/site/cadastrobarragens.asp>>. Acesso em: 25 abr. 2010.

### Concreto consumido

Massa de concreto aplicado = volume de concreto consumido x massa específica

Volume consumido	2.119.533	m <sup>3</sup>	*Comitê Brasileiro de Barragens
Massa específica	2.500 kg/ m <sup>3</sup>		Pinheiro, Helene, Figueiredo (2010)
Massa de concreto consumido = 2.119.533 m <sup>3</sup> x 2500 kg/ m <sup>3</sup> = 5,30 E+09 kg			
Energia específica do concreto	1,81 E+12	seJ/kg	Pulselli et al. (2007)
Concreto consumido = 5,30 E+09 kg x 1,81 E+12 seJ/kg / 100 ano = 9,59E+19 seJ/ano			

\*Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/site/cadastrobarragens.asp>>. Acesso em: 25 abr. 2010.

### Perda de solo fértil

Perda SF = área alagada x profundidade do solo x densidade x porcentagem de matéria orgânica x energia/massa matéria orgânica. x fator de conversão/tempo

Área alagada (espelho d'água)	2250	km <sup>2</sup>	CESP*
Profundidade do solo	3,0 E-01	m	Odum (2000)
Densidade	1,43 E+06	g/m <sup>3</sup>	Odum (2000))
Matéria orgânica	2%		
Energia/massa de matéria orgânica	5,4	kcal/g	Odum (2000)
Tempo	100	ano	
Fator de conversão	4186	J/kcal	
PerdaSF=2250km <sup>2</sup> x10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> x3,0E-01mx1,43E+06g/m <sup>3</sup> x2E-02x5,4kcal/gx4186J/cal/ 100 ano= 4,36 E+15 J/ano			
Transformidade	1,24 E+05	seJ/J	Odum (2000)
Perda SF = 4,36 E+15 J/ano x 1,24 E+05 seJ/J = 5,41 E+20 seJ/ano			

\*Disponível em: <[www.cesp.com.br](http://www.cesp.com.br)>. Acesso em: 30 mar. 2012.

### Perda de floresta

Na região considerada, a vegetação na década de 1960 era classificada como Floresta Estacional Semidecidual (Mata Atlântica) com 50 toneladas de C equivalente por hectare. Melo e Durigan (2006). Além desse tipo de vegetação existia atividade pecuária. Desta forma, optou-se neste trabalho por considerar uma

proporção de 80% da área como pasto e somente 20% como área classificada acima.

Massa/área	50	t/ha	Pereira (2008)
Energia/massa	4.000	kcal/kg	Pereira (2008)
Área alagada (reservatório)	2.250	km <sup>2</sup>	CESP*
Fator de conversão	4.186	J/kcal	
NPP	0,35 kg/m <sup>2</sup> ano		Pereira (2008)

Energia relativa à biomassa =  $0,20 \times 2250 \times 10^6 \times 0,93 / 0,55 \times 4186 \times 4.000 = 1,27 \times 10^{16}$  J

Transformidade  $1,77 \times 10^4$  seJ/J Pereira (2008)

Energia  $1,27 \times 10^{16} \times 1,33 \times 10^4$  seJ/J =  $1,69 \times 10^{20}$  seJ

Energia relativa ao pasto =  $0,80 \times 2250 \times 10^6 \times 0,35 / 0,55 \times 4186 \times 4000 = 1,92 \times 10^{16}$  J

Energia =  $1,27 \times 10^{16} \times 1,77 \times 10^4 = 3,40 \times 10^{20}$  seJ

Perda F =  $1,60 \times 10^{20}$  J/ano  $\times 3,40 \times 10^4$  seJ/J =  $5,09 \times 10^{20}$  seJ

Perda total =  $1,79 \times 10^{17}$  seJ/ano +  $2,84 \times 10^{18}$  seJ/ano =  $3,02 \times 10^{18}$  seJ/ano

\*\*Disponível em: <www.cesp.com.br>. Acesso em: 30 mar. 2012.

### Energia geopotencial da chuva

Energia GPC = área x elevação média x runoff x densidade x aceleração da gravidade

Área (bacia geográfica)	2250	km <sup>2</sup>	CESP*
Elevação média	236**	m	
Runoff	1***	m/ano	
Densidade	1 E+3	kg/ m <sup>3</sup>	
Aceleração da gravidade	9,8	m/s <sup>2</sup>	

\*Disponível em: <www.cesp.com.br>. Acesso em: 30 mar. 2012.

\*\* Por dificuldade na obtenção desta informação, foi adotada a elevação média da cidade.

\*\*\* Valor adotado

Energia GPC = área x elevação média x densidade x aceleração da gravidade

Energia =  $2250 \times 10^4 \text{ km}^2 \times 1 \times 10^6 \text{ m}^2 / \text{km}^2 \times 236 \text{ m} \times 1 \text{ m/ano} \times 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 5,20 \times 10^{15}$  J/ano

### Energia química da chuva

Energia QC = Precipitação média x Energia Livre de Gibbs x área

Precipitação média	1779,5	mm/ano	CPTEC*
Energia Livre de Gibbs	4,94 E+06	J/m <sup>3</sup>	Odum (1996)
Área (reservatório)	2250	km <sup>2</sup>	CESP**

Energia QC =  $1779,5 \text{ mm/ano} \times 1 \times 10^{-3} \text{ m/mm} \times 4,94 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \times 2.250 \text{ km}^2 \times 10^6 \text{ m}^2 / \text{km}^2 = 1,97 \times 10^{16}$  J/ano

Transformidade  $3,12 \times 10^4$  seJ/J Odum (1996)

Energia QC =  $1,97 \text{ E}+16 \text{ J/ano} \times 3,12 \text{ E}+04 \text{ seJ/J} = 6,15 \text{ E}+20 \text{ seJ/ano}$

\* CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <[www.cptec.inpe.br](http://www.cptec.inpe.br)>. Acesso em: 12 nov. 2011.

\*\*Disponível em: <[www.cesp.com.br](http://www.cesp.com.br)>. Acesso em: 30 mar. 2012.

### Energia do sol

Energia do Sol = área x insolação média x (1 - albedo)

Área (reservatório) 2.250 km<sup>2</sup> CESP\*

Insolação média (Ivinhema-MS a 87,5 km) 5,06 kWh/m<sup>2</sup>dia CRESESB

Albedo 0,055 Cogley (1979)

Energia do Sol =  $2.250 \text{ E}+03 \text{ km}^2 \times \text{E}+06 \text{ m}^2 / \text{km}^2 \times 5,06 \text{ E}+03 \text{ J/s h} \times 3600 \text{ s/h} / \text{m}^2 \text{ dia} \times 365 \text{ dia/ano} \times (1-0,055) = 1,41 \text{ E}+19 \text{ seJ/ano}$

A insolação foi obtida no site da CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 12 nov. 2012.

Para o Albedo, foi considerada a média dos valores anuais calculados por Sivkov, S.I. e Grishchenko, D.L., constantes da Tabela 7 página 780 do Volume 107 da American Meteorological Societe.

\*Disponível em: <[www.cesp.com.br](http://www.cesp.com.br)>. Acesso em: 30 mar. 2012.

### Energia geopotencial do rio

Para cálculo do volume anual foi considerada a vazão turbinada conforme dados da CESP\* constantes no Apêndice C. O mesmo critério foi usado para a queda vertical.

Energia GPR = vazão x queda vertical x densidade x aceleração da gravidade

Vazão 7073 m<sup>3</sup>/s CESP\*

Queda vertical 18,95 m CESP\*

Densidade 1 E3 kg/m<sup>3</sup>

Aceleração da gravidade 9,8 m/s<sup>2</sup>

Energia GPR =  $7.070 \text{ m}^3/\text{s} \times 8760 \text{ h/ano} \times 3600 \text{ s/ano} \times 18,95 \text{ m} \times 1 \text{ E}+03 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 4,13 \text{ E}+16 \text{ J}$

Transformidade  $2,35 \text{ E}+04 \times 1,68 = 3,95 \text{ E}+0 \text{ seJ/J}$  (BROWN E Mc CLANAHAM 1996)

Energia GPR =  $4,13 \text{ E}+16 \text{ J} \times 3,95 \text{ E}+04 = 1,63 \text{ E}+21 \text{ seJ/ano}$

\*Disponível em: <[www.cesp.com.br](http://www.cesp.com.br)>. Acesso em: 30 mar. 2012.

### Operação e manutenção

OpMan = Potência x tempo x custo

OpMan =  $1540 \text{ MW} \times 365 \times 24 \text{ h/ano} \times \text{R}\$40 / \text{MWh} = 5,39 \text{ E}+08 \text{ R}\$/\text{ano}$

EMR 0,93 E+12 seJ/R\$ Cutrim (2011)

$$\text{OpMan} = 5,39 \text{ E}+08 \text{ R\$/ano} \times 0,93 \text{ E}+12 \text{ seJ/R\$} = 5,01 \text{ E}+20 \text{ seJ/ano}$$

### Perda de sedimentos

A concentração média foi calculada com base em 6 medições realizadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB no ano de 2009.

Para cálculo do volume anual foi considerada a vazão média (CESP).

$\text{PS} = \text{vazão média} \times \text{tempo} \times \text{concentração} \times \text{energia/massa} \times \text{fator de conversão}$

Vazão média	6.981	$\text{m}^3/\text{s}$	CESP*
Concentração	55,3	$\text{g}/\text{m}^3$	CETESB
Energia/massa	0,0054	kcal/g	Brown e McClanahan (1996)
Fator de conversão		4.186	J/kcal

$$\text{PS} = 6.981 \text{ m}^3/\text{s} \times 365 \times 24 \times 3600 \text{ s/ano} \times 55,3 \text{ g}/\text{m}^3 \times 0,0054 \text{ kcal}/\text{g} \times 4.186 \text{ J}/\text{kcal} = 2,75 \text{ E}+14 \text{ J}$$

$$\text{Transformidade} = 6,30 \text{ E}+4 \text{ seJ}/\text{J} \quad \text{Brown e McClanahan (1996)}$$

$$\text{Energia} = 2,75 \text{ E}+14 \text{ J} \times 6,30 \text{ E}+4 = 1,73 \text{ E}+19 \text{ seJ/ano}$$

\*Disponível em: <www.cesp.com.br>. Acesso em: 30 mar. 2012.

### Evaporação

Volume evaporado = área x volume/área.ano

$$\text{Volume evaporado} = 2250 \text{ E}+06 \text{ m}^2 \times 324 \text{ L}/\text{m}^2 \times \text{m}^3 / 1000 \text{ L} = 7,29 \text{ E}+08 \text{ m}^3$$

$$\text{Transformidade} = 2,46 \text{ E}+10 \times 1,68 = 4,13 \text{ E}+10 \text{ seJ}/\text{m}^3$$

$$\text{Energia} = 7,29 \text{ E}+08 \text{ m}^3 \times 4,13 \text{ E}+10 \text{ seJ}/\text{m}^3 = 3,01 \text{ E}+19 \text{ seJ}$$

### Eletricidade produzida (Energia Gerada)

Energia Gerada = Potência x tempo

$$\text{Potência instalada} = 1540 \text{ MW} \quad \text{CESP*}$$

$$\text{Energia Gerada} = 1540 \text{ MW} \times 8.760 \text{ h/ano} = 1,36 \text{ E}+07 \text{ MWh/ano}$$

$$\text{Energia Gerada} = 1540 \text{ E}+6 \times 8.760 \text{ h/ano} \times 3600 \text{ s/h} = 4,86 \text{ E}+16 \text{ J/ano}$$

$$\text{Energia Gerada} \times \text{transformidade} = 4,86 \text{ E}+16 \times 8,31 \text{ E}+04 = 4,04 \text{ E}+21 \text{ seJ/ano}$$

\*Disponível em: <www.cesp.com.br>. Acesso em: 30 mar. 2012.

## APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DOS ÍNDICES CALCULADOS E VALORES AUXILIARES

### UHE Eng. Souza Dias (Jupiá)

#### Uso da energia expressa em área indireta (km<sup>2</sup>)

##### Área = Recursos da economia / EQC

Recursos da economia com serviços: 3,79 E+21 seJ/ano

Recursos da economia sem serviços: 6,38 E+20 seJ/ano

Energia QC = 1815,6 mm/ano x m/10<sup>3</sup>mm x 4,94 E+06 J/m<sup>3</sup> x 3,12 E+04 seJ/J = 2,80 E+11 seJ/ km<sup>2</sup> ano (apêndice A)

Área Indireta (sem serviços) = 1,33E+20 / 2,80E+11 x E-06 km<sup>2</sup>/ m<sup>2</sup> = 475 km<sup>2</sup>

Área Indireta (com serviços) = 6,38E+20 / 2,80E+11 x E-06 km<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> = 2278 km<sup>2</sup>

#### Energia da água de geração = vazão (m<sup>3</sup>) x densidade (g/m<sup>3</sup>) x Gibbs (J/g) x Transformidade (seJ/J)

= 6440m<sup>3</sup>/s x 1,0 E+06g/m<sup>3</sup> x 8760h/ano x 3600s x 4,94 (J/g) x 3,95 E+4 (seJ/J) = 3,96 E+22 seJ/ano

#### Energia da eletricidade produzida = Potência instalada (MW) x tempo (s) x Transformidade (seJ/J) =

= 1550,2 E+06 J / s x 8760 h / ano x 3600 s/h x 5,16 E+04 = 2,52 E+21 seJ/ano

#### Energia da água de suporte = V RESERVATÓRIO (m<sup>3</sup>) x densidade (g/m<sup>3</sup>) x Gibbs (J/g) x Transformidade (seJ/J) x número de renovações/ano

= 3,68 E+09 m<sup>3</sup> x 52,89 x E+06 g/ m<sup>3</sup> x 4,94 J/g x 8,13 E+04 seJ/J = 7,83 E+24 seJ/ano

#### Índice de Eficiência da Água de Geração

IEAG = VOLUME ÁGUA DE GERAÇÃO / ELETRICIDADE PRODUZIDA EM MWh

VOLUME ÁGUA DE GERAÇÃO = 6.440m<sup>3</sup>/s x 8760h/ano x 3600s/h = 2,03 E+11 m<sup>3</sup>

ELETRICIDADE PRODUZIDA EM MWh = 1550,2 MW x 8760 h/ano = 1,36 E+07 MWh/ano

IEAG = VOLUME ÁGUA DE GERAÇÃO (m<sup>3</sup>) / ELETRICIDADE PRODUZIDA EM MWh

IEAG = 2,03 E+11 / 1,36 E+07 = 1,49 E+04 m<sup>3</sup> / MWh

### Índice de Eficiência da Água de Suporte (IEAS)

$$\text{IEAS} = \text{VOLUME } \text{ÁGUA SUP (m}^3\text{)} / \text{ELETRICIDADE PRODUZIDA (MWh)}$$

$$\text{VOLUME } \text{ÁGUA DE SUPORTE} = 3,68 \text{ E}+09 \text{ m}^3 \times 52,89 = 1,94 \text{ E}+11 \text{ m}^3$$

$$\text{IEAS } 1,94 \text{ E}+11 / 1,36 \text{ E}+07 \text{ MWh} = 1,43 \text{ E}+04 \text{ m}^3 / \text{MWh}$$

### Índice de Eficiência da Água Total (IEAT)

$$\text{IEAT} = \text{VOLUME } \text{ÁGUA TOTAL (m}^3\text{)} / \text{ELETRICIDADE PRODUZIDA (MWh)} \quad (9)$$

$$\text{VOLUME } \text{ÁGUA TOTAL (m}^3\text{)} = \text{VOLUME } \text{ÁGUA DE GERAÇÃO} + \text{VOLUME } \text{ÁGUA DE SUPORTE} =$$

$$2,03 \text{ E}+11 + 1,94 \text{ E}+11 = 3,97 \text{ E}+11$$

$$\text{IEAT} = 3,97 \text{ E}+11 / 1,36 \text{ E}+07 = 2,92 \text{ E}+04$$

### Índice de Transferência de Energia (instantâneo) = Energia da água de geração + Energia da água de suporte) / Energia da eletricidade produzida

Energia da água de geração (em 1 s)

$$= \text{Energia anual da água de geração} / 8760\text{h/anox}3600\text{s/h} =$$

$$= 3,96 \text{ E}+22 \text{ seJ/ano} / 8760\text{h/anox}3600\text{s/h} = 1,26 \text{ E}+15 \text{ seJ}$$

$$\text{Energia da água de suporte (em 1 s)} = 1,48 \text{ E}+21 \text{ seJ}$$

$$\text{Energia da Eletricidade produzida (em 1s)} = \text{Energia anual produzida} /$$

$$8760\text{h/anox}3600\text{s/h} = 2,52 \text{ E}+21 \text{ seJ/ano} / 8760\text{h/anox}3600\text{s/h} = 7,99 \text{ E}+13 \text{ seJ}$$

$$\text{ITE inst.} = (1,26 \text{ E}+15 + 1,48 \text{ E}+21) / 7,99 \text{ E}+13 = 1,85 \text{ E}+07$$

(valor em seJ de água total / seJ de eletricidade produzida)

### Índice de Transferência de Energia (anual) = Energia da água de geração + Energia da água de suporte) / Energia da eletricidade produzida

Conforme cálculos constantes deste apêndice têm-se:

$$\text{Energia da água de geração} + 3,96 \text{ E}+22 \text{ seJ/ano}$$

$$\text{Energia da água de suporte} = 1,48 \text{ E}+21 \times 52,89 = 7,83 \text{ E}+22 \text{ seJ/ ano}$$

$$\text{Energia da Eletricidade produzida} = 2,52 \text{ E}+21 \text{ seJ/ano}$$

$$\text{ITE anual.} = (3,96 \text{ E}+22 + 1,48 \text{ E}+21) / 2,52 \text{ E}+21 = 1,85 \text{ E}+07 = 46,78$$

(valor em seJ de água total / seJ de eletricidade produzida)



**UHE Eng. Sérgio Motta (Porto Primavera)****Uso da energia expressa em área indireta (km<sup>2</sup>)**

Área indireta = Recursos da economia / Energia QC

Recursos da economia com serviços: 6,88 E+20 seJ/ano

Recursos da economia sem serviços: 1,87 E+20 seJ/ano

EQC = 1779,5 mm/ano x m/10<sup>3</sup> mm x 4,94 E+06 J/m<sup>3</sup> x 3,12 E+04 seJ/J x E+06

m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup> = 2,74 E+17 seJ/m<sup>2</sup> ano

Área Indireta (com serviços) = 6,88 E+20 / 2,74 E+17 = 2.511 km<sup>2</sup>

Área Indireta (sem serviços) = 1,87 E+20 / 2,74 E+17 = 682 km<sup>2</sup>

**Energia da água de geração = vazão (m<sup>3</sup>/s) x tempo (s) x densidade (g/m<sup>3</sup>) x Gibbs (J/g) x Transformidade (seJ/J)**

= 7073 m<sup>3</sup>/s x 1,0E+06 g/m<sup>3</sup> x 8760 h/ano x 3600 s/h x 4,94 (J/g) x 3,95 E+4 seJ/J = 4,35 E+22 seJ/ano

**Energia da eletricidade produzida = Potência instalada (MW) x tempo (s) x Transformidade (seJ/J)**

= 1540 E+06 J/s x 8760 h/ano x 3600 s/h x 8,31 E+04 seJ/J = 4,03 E+21 seJ/ano

**Energia da água de suporte = V RESERVATÓRIO (m<sup>3</sup>) x densidade (g/m<sup>3</sup>) x Gibbs (J/g) x Transformidade (seJ/J) x número de renovações /ano**

= 2,00 E+10 m<sup>3</sup> x E+06 g/m<sup>3</sup> x 4,94 J/g x 8,13 E+04 seJ/J x 10,76 = 8,64 E+22 seJ/ano

**Índice de Eficiência da Água de Geração**

IEAG = VOLUME ÁGUA DE GERAÇÃO / ELETRICIDADE PRODUZIDA EM MWh

VOLUME ÁGUA DE GERAÇÃO = 7073 m<sup>3</sup>/s x 8760 h/ano x 3600 s/h = 2,23 E+11 m<sup>3</sup>/ano

ELETRICIDADE PRODUZIDA EM MWh = 1540 MW x 8760 h = 1,35 E+07 MWh/ano

IEAG = VOLUME ÁGUA DE GERAÇÃO / ELETRICIDADE PRODUZIDA EM MWh

IEAG = 2,23 E+11 / 1,35 E+07 = 1,65 E+04 m<sup>3</sup> / MWh

### Índice de Eficiência de Uso da Água de Suporte (IEAS)

$$\text{IEAS} = \text{VOLUME } \text{ÁGUA DE SUPORTE (m}^3\text{)} / \text{ELETRICIDADE PRODUZIDA (MWh)}$$

$$\text{IEAS} = 2,0 \text{ E}+10 \text{ m}^3 \times 10,76 = 2,15 \text{ E}+11$$

$$1,35 \text{ E}+07 \text{ MWh} = 1,59 \text{ E}+04 \text{ m}^3 / \text{MWh}$$

### Índice de Eficiência de Uso da Água de Total (IEAT)

$$\text{IEAT} = \text{VOLUME } \text{ÁGUA TOTAL (m}^3\text{)} / \text{ELETRICIDADE PRODUZIDA (MWh)} \quad (9)$$

$$\text{VOLUME } \text{ÁGUA TOTAL (m}^3\text{)} = \text{VOLUME } \text{ÁGUA DE GERAÇÃO} + \text{VOLUME } \text{ÁGUA DE SUPORTE} =$$

$$2,23 \text{ E}+11 + 2,15 \text{ E}+11 = 4,38 \text{ E}+11 \text{ m}^3$$

$$\text{IEAT} = 4,38 \text{ E}+11 / 1,35 \text{ E}+07 = 3,24 \text{ E}+04$$

### Índice de Transferência de Energia (instantâneo) (ITE)

**Índice de Transferência de Energia (instantâneo) = Energia da água de geração + Energia da água de suporte) / Energia da eletricidade produzida**

Energia da água de geração (em 1 s)

$$= \text{Energia anual da água de geração} / 8760\text{h/ano} \times 3600\text{s/h} =$$

$$= 4,35 \text{ E}+22 \text{ seJ/ano} / 8760\text{h/ano} \times 3600\text{s/h} = 1,85 \text{ E}+15 \text{ seJ}$$

Energia da água de suporte (em 1 s) = 8,03 E+21 seJ

Energia da Eletricidade produzida (em 1s) = Energia anual produzida / 8760h/ano x 3600s/h = 8,03 E+21 seJ/ano / 8760h/ano x 3600s/h = 1,28 E+14 seJ

$$\text{ITE inst.} = (1,85 \text{ E}+15 + 8,03 \text{ E}+21) / 1,28 \text{ E}+14 = 6,27 \text{ E}+07$$

(valor em seJ de água total / seJ de eletricidade produzida)

### Índice de Transferência de Energia (anual) (ITE)

Conforme cálculos constantes deste apêndice têm-se:

Energia da água de geração + 4,35 E+22 seJ/ano

Energia da água de suporte = 8,04 E+21 x 10,76 = 8,64 E+22 seJ/ ano

Energia da Eletricidade produzida = 4,03 E+21 seJ/ano

$$\text{ITE anual.} = (4,35 \text{ E}+22 + 8,64 \text{ E}+22) / 4,03 \text{ E}+21 = 32,63$$

(valor em seJ de água total / seJ de eletricidade produzida)

## APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS DAS UHEs

**Obtidas no site da CESP – Cia. Energética de São Paulo**

**www.cesp.com.br consultado em 25/08/2010**

**Usina Hidrelétrica Eng. Souza Dias - Jupia**

### **Características**

#### **Condições de montante**

Área da bacia hidrográfica	470.000 km <sup>2</sup>
Área do espelho d'água (N.A. 280,00 m)	330 km <sup>2</sup>
Volume morto	2.450 E6 m <sup>3</sup>
Volume útil 903E6 m <sup>3</sup>	
Volume reservado para cheia de projeto 168 E6 m <sup>3</sup>	

#### **Barragem de concreto**

Comprimento no coroamento 1.040,00 m

#### **Barragem de terra**

Comprimento no coroamento –

Ombreira esquerda 2.385,00 m

Ombreira direita 2.070,00 m

#### **Níveis característicos de montante**

N.A. máximo maximorum 280,50 m

N.A. máximo útil 280,00 m

N.A. mínimo útil 280,00 m

Vazão média de longo termo (MLT período 1931 - 2005) 6.350 m<sup>3</sup>/s

Vazão defluente máxima média diária observada (10/02/83) 28.943 m<sup>3</sup>/s

#### **Condições de jusante**

N.A. máximo maximorum 270,00 m

N.A. máximo 265,00 m

N.A. mínimo 254,60 m

Vazão máxima dos vertentes (N.A. 280,50 m) 50.130 m<sup>3</sup>/s

Vazão turbinada nominal total 6.440 m<sup>3</sup>/s

#### **Unidades geradoras - turbinas**

Tipo Kaplan de eixo vertical

Turbinas instaladas 14

Potência nominal unitária 103.000 kW

Queda de referência 21,30 m

Engolimento máximo 727 m<sup>3</sup>/s

### **Unidades geradoras - geradores**

Tipo Umbrella eixo vertical

Potência nominal 110.800 kW

Potência nominal total instalada 1.551.200 kW

### **Órgãos de descarga**

Comportas de superfície 4

Dimensões do vão 15,00 x 12,80 m

Cota da soleira 268,00 m

Cota de topo da comporta de superfície 280,00 m

Descarga máxima por vão (N.A. 280,00 m) 1.250 m<sup>3</sup>/s

Descarga máxima por vão (N.A. 280,50 m) 1.358 m<sup>3</sup>/s

Comportas de fundo 37

Dimensões do vão 10,00 x 7,61 m

Cota da soleira 255,00 m

Descarga máxima por vão (N.A. 280,00 m) 1.189 m<sup>3</sup>/s

Descarga máxima por vão (N.A. 280,50 m) 1.208 m<sup>3</sup>/s

## **Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (Porto Primavera)**

### **Características**

#### **Condições de montante**

Área da bacia hidrográfica 574.000 km<sup>2</sup>

Área do espelho d'água (N.A. 280,00 m) 2.250 km<sup>2</sup>

Volume morto 15,7 E6 m<sup>3</sup>

Volume útil 903 E6 m<sup>3</sup>

Volume reservado para cheia de projeto 168 E6 m<sup>3</sup>

#### **Barragem de concreto e de terra**

Comprimento total do coroamento 10.186,20 m

#### **Níveis característicos de montante**

N.A. máximo maximorum 259,70 m

N.A. máximo útil 259,00 m

N.A. mínimo útil 257,00 m

Vazão média de longo termo (MLT período 1931 - 2005) 7.145 m<sup>3</sup>/s

Vazão defluente máxima média diária observada (10/02/83) 18.625 m<sup>3</sup>/s

### **Condições de jusante**

N.A. máximo maximum 244,60 m

N.A. máximo 239,80 m

N.A. mínimo 237,80 m

Vazão máxima dos vertentes (N.A. 280,50 m) 44.150 m<sup>3</sup>/s

Vazão turbinada nominal total 7.070 m<sup>3</sup>/s

### **Unidades geradoras - turbinas**

Tipo Kaplan de eixo vertical

Turbinas instaladas 14

Potência nominal unitária 111.800 kW

Queda de referência 18,95 m

Engolimento máximo 651,6 m<sup>3</sup>/s

### **Unidades geradoras - geradores**

Tipo SAT 1290-152-96 ATIMAVF 1250/163/96

Potência nominal 117.000 kW

Potência nominal total instalada 1.540.000 kW

### **Órgãos de descarga**

Comportas de superfície 16

Dimensões do vão 15,00 x 23,00 m


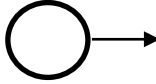





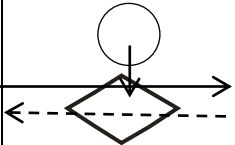
Cota da soleira 236,538 m

Cota de topo da comporta de superfície 260,00 m

Descarga máxima por vão (N.A. 280,00 m) 3.195 m<sup>3</sup>/s

Descarga máxima por vão (N.A. 280,50 m) 3.350 m<sup>3</sup>/s

## APÊNDICE D – SÍMBOLOS USADOS NO DIAGRAMA DA FIGURA 8

	<p>Fluxo de energia: fluxo cuja vazão é proporcional ao volume do estoque ou à intensidade da fonte que o produz.</p>
	<p>Fonte: recurso externo que fornece energia de acordo com um programa controlado externamente (função força).</p>
	<p>Sorvedouro de energia: o sistema usa a energia potencial para produzir trabalho; o custo dessa transformação é a degradação da energia, que abandona o sistema como energia de baixa qualidade; todos os processos de interação e armazenamento dissipam energia.</p>
	<p>Interação: interseção de no mínimo dois fluxos de energia para produzir uma saída (trabalho) que varia de acordo com certa função de energia; exemplo uma ação que controla um fluxo sobre o outro; presença de um fator limitante como uma válvula.</p>
	<p>Depósito: reserva de energia dentro dos limites do sistema determinada pelo balanço de entradas e saídas.</p>
	<p>Produtor: Unidade que coleta e transforma energia de baixa intensidade sob a ação de um ou mais fluxos de energia de alta qualidade.</p>
	<p>Consumidor: unidade que usa e transforma a energia, a armazena como energia de maior qualidade e retroalimenta energia (sistema auto catalítico).</p>
	<p>Transação: Intercâmbio de recursos; venda de bens ou serviços (traço contínuo) em troca de um pagamento em dinheiro (traço tracejado); o preço é mostrado no símbolo como fonte de energia externa.</p>