



Acc4themic

INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

“INTEGRATING CLEANER PRODUCTION INTO SUSTAINABILITY STRATEGIES”

Energia e Hidroeletricidade

TASSINARI, C.A.^{a,*}, BONILLA, S.H.^a,

a. Universidade Paulista, São Paulo

**Corresponding author, tassiel@gmail.com*

Resumo

A construção de usinas hidroelétricas gera controvérsias, já que no primeiro momento, traz desconforto pelo deslocamento das pessoas atingidas, com perda de patrimônio, perda de lavouras, vegetação, solo etc. A seguir, o desenvolvimento da região com os consequentes benefícios como a geração de empregos, e outras atividades, antecipam o que levaria décadas para acontecer na região. No Brasil tem sido intensificada a geração de hidroeletricidade em Usinas Hidroelétricas (UHEs) que operam sem reservatório de água (ou com reservatórios menores), conhecidas como “modelo fio d’água”.

No ano de 2005, 93% da energia elétrica disponibilizada para consumo foi gerada na forma hidroelétrica. De acordo com o Plano Nacional de Energia elaborado pelo Ministério das Minas e Energia (MME), dentre as diversas fontes de geração, a hidroeletricidade ainda se manterá predominante até 2030. Tanto os benefícios quanto os custos ambientais globais foram contabilizados em termos de energia para duas plantas hidroelétricas brasileiras (Porto Primavera and Jupia). Os indicadores em energia tradicionais foram calculados, e novos indicadores foram propostos para conseguir evidenciar outros aspectos tais como: equilíbrio entre empreendimento hidroelétrico e região, uso mais adequado da água, influencia do tamanho do reservatório e perdas de serviços ambientais.

Palavras-chave: Energia, Hidroeletricidade, Contabilidade em Energia, Serviços Ambientais

1. Introdução

No Brasil, embora cerca de 90% da geração de energia elétrica requerida em 2012 no Sistema Interligado Nacional – SIN tenha sido gerada por meio de hidroelétricas (ONS 2012), apenas pouco mais de 30% desse potencial foi explorado. As hidroelétricas correspondem a 75% da potência instalada no país. (ANEEL 2012). O Brasil detém 10% dos recursos hídricos mundiais, ocupando o topo da lista dos países com esse potencial. De acordo com o Plano Nacional de Energia (PNE) para 2030, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério das Minas e Energia (MME), a hidroeletricidade ainda se manterá predominante no período de 25 anos, 2005/2030. No Plano considera-se ainda que do potencial hidroelétrico nacional total que permite a instalação de uma capacidade de cerca de 260 GW, foi identificada uma parcela de 174 GW como aproveitável até o ano 2030. Tendo em vista ser necessária uma capacidade instalada para atendimento da demanda, em 2030, de 225 GW a estratégia de expansão até 2030 indica, por razões de competitividade econômica com as termelétricas, a utilização da quase totalidade do potencial considerado como aproveitável até 2030. Assim, no horizonte do Plano, dos 174 GW considerados, estariam aproveitados, em 2030, aproximadamente 164 GW, o que representa 94% do montante disponibilizado. No Brasil para a geração de hidroeletricidade em centrais hidroelétricas é usada também a tecnologia chamada de “fio d’água” que não requer a formação de represas (ou requer represas menores) para a operação da unidade. Muitas Usinas Hidroelétricas (UHE) foram construídas com base nessa tecnologia e estão em operação. As UHEs chamadas “fio d’água”, são próximas a superfície e aproveitam a velocidade do rio para gerar energia. Essas usinas reduzem as áreas de alagamento e formam pequenos reservatórios

“INTEGRATING CLEANER PRODUCTION INTO SUSTAINABILITY STRATEGIES”

(ou nenhum reservatório) para estocar a água. 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. A capacidade de armazenamento é diminuída bem como a energia armazenada para períodos de seca (ANNEL 2002).

2. Materiais e métodos

2.1 Descrição do sistema

Este estudo tem como foco principal a análise em emergia da geração de energia elétrica em duas (UHEs): a Engenheiro Sergio Motta, conhecida como Usina Porto Primavera que será tratada como UHE PP, e a Engenheiro Souza Dias, conhecida como Usina Jupiá que será tratada como UHE Jupiá. Ambas estão situadas no mesmo leito fluvial, o rio Paraná e são gerenciadas pela mesma empresa, a Cia. Energética de São Paulo–CESP. Possuem praticamente a mesma potência instalada, 1540MW na UHE PP e 1550,2 MW na UHE Jupiá. A UHE PP possui um reservatório de 2250 km², formado pela interrupção do fluxo do curso normal do rio. O reservatório, além de armazenar energia na forma de água, permite a formação do desnível necessário para configuração da energia hidráulica, a captação de água em volume adequado e a regularização da vazão dos rios em períodos de chuva ou estiagem. A vegetação que existia e ficou submersa quando da formação do reservatório é classificada como Floresta Estacional Semidecidual (Mata Atlântica) com 98,9 toneladas de biomassa por hectare (MELO E DURIGAN). A UHE Jupiá é considerada por especialistas uma usina semi fio d'água, pois para uma potência instalada maior que a UHE Porto Primavera (1550,2 MW) possui um reservatório quase seis vezes menor (330 km²). A vegetação que existia e ficou submersa quando da formação do reservatório é classificada como cerrado com 159,4 toneladas de biomassa por hectare (MELO E DURIGAN). Ambas possuem 14 unidades geradoras com turbinas Kaplan.

2.2 Ferramenta metodológica

A Emergia é definida como a quantidade de energia solar direta ou indiretamente necessária para apoiar um determinado sistema e seu nível de organização (ODUM 1996). A emergia dos insumos que alimentam um sistema ou que sejam por ele produzidos é calculada em termos de joules de energia solar (seJ) por meio das transformidades que são expressas em seJ/J ou de fatores de conversão adequados expressos em seJ/g, seJ/unidade monetária etc. A emergia é também entendida como uma memória da energia que foi incorporada ao sistema, fluxo ou produto desde a fotossíntese que ocorreu para gerar a biomassa que deu origem à matéria prima, se esta for sua origem, somada a cada quantidade gasta em todos os processamentos posteriores até que se chegue ao produto final. A emergia total que dirige um processo ou produto passa a ser uma medida da atividade de auto-organização do meio circundante convergindo para tornar possível tal processo ou produto. É uma medida do serviço ambiental necessário para fornecer um dado recurso. 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 mais concentrada. Assim, a energia na madeira é mais concentrada que na ramagem que lhe deu origem, no carvão é mais concentrada que na madeira e na eletricidade é mais concentrada que no carvão. Desta forma, transformidades são indicadores de qualidade, pois quantificam a energia incorporada ao produto considerando a energia total usada para produzi-lo (ULGIATI & BROWN 2009). Após converter para seJ todos os fluxos de matéria, energia, moeda e serviços humanos ou não que entram, saem e/ou interagem dentro do sistema em estudo, os mesmos são classificados em Renováveis (R) que são aqueles que a Natureza consegue repor dentro do espaço de tempo considerado no estudo. Não renováveis (N) que são os que requerem tempo maior para sua reposição. Fluxos provenientes da economia (F) que representam os serviços, humanos ou não, os materiais, os recursos em moeda etc. e os fluxos de saída (Y) que representam os produtos de saída do processo. A seguir, seus valores são considerados na Contabilidade Ambiental em Emergia que é uma evolução dos estudos de Odum (ODUM 1988 e ODUM 1996). 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).

2.3 Diagrama

No diagrama apropriado da Figura 1 os valores de todos os fluxos são assinalados. Nesta fase, uma representação adequada é importante para a análise de todos os fluxos de matéria e energia que ocorrem dentro do sistema. Os símbolos usados foram criados por Odum (ODUM, 1996).

2.4 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 como BUENFIL, RECH e outros autores referenciados no memorial de cálculo. Transformidades e emergias específicas foram obtidas de trabalhos disponíveis na literatura. Os valores encontrados em trabalhos com datas anteriores a 2000 foram corrigidos por meio do fator 1,68 de acordo com ODUM 2000. Outros posteriores a 2000, também sofreram correção em função da linha de base adotada. A linha de base atual é 15,83 E+24 seJ/ano. As características específicas como tipo de vegetação e características físicas ou químicas também foram obtidos em trabalhos publicados conforme citações no memorial de cálculo por autores.

3. Índices

Com base nos valores obtidos, índices são calculados para comparar o desempenho de cada UHE. Os índices a seguir são resultantes dos estudos de ODUM.

Investimento em energia:

A relação de investimento em energia é calculada pela divisão da energia que entra no processo proveniente da economia (F) pela soma da energia total local (renovável e não renovável) ver Eq. 1.

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

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

Rendimento em energia:

A relação de rendimento em energia, dada pela energia da eletricidade produzida dividida pela soma das energias dos insumos da economia (ver Eq. 2). É uma medida da contribuição líquida do sistema para a economia (ODUM 1996).

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

É o retorno do investimento em energia. Sendo o dinheiro 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 sociedade dos vários processos de produção. Quanto maior o valor de EYR a 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 em energia 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) ver Eq. 3.

Um alto valor deste índice reflete um alto estresse ambiental e/ou um alto nível tecnológico. Esta relação aumenta quando é empregada alta tecnologia ou quando se empregam poucos recursos renováveis.

$$ELR = (F + N)/R. \quad (3)$$

Índice de Sustentabilidade:

O índice de sustentabilidade definido pela relação entre o rendimento em energia (EYR) e o índice de carga ambiental (ELR) ver Eq. 4.

$$ESI = EYR/ELR \quad (4)$$

A determinação dos índices de carga ambiental e de sustentabilidade requer informações sobre os fluxos de recursos renováveis e não renováveis. Isso não é considerado no cálculo da relação de rendimento em energia. O conceito de sustentabilidade fica atrelado à maximização de EYR (rendimento) e a 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 SI menores que 1 são indicativos de UHEs não sustentáveis em 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).

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

O fluxo de energia por unidade de área e tempo (*empower density*) é a relação entre o fluxo total de energia na saída (Y) no período considerado (um ano) dividido pela área direta do empreendimento (ver Eq. 5). Um sistema organiza sua estrutura e suas funções de acordo com a quantidade e 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 emergética altera a estrutura e a organização sistema (ODUM 1994). Este índice permite comparar a alteração causada pela instalação e operação de cada UHE.

$$ED = Y / \text{área} \quad (5)$$

Custo em energia:

O Custo em Energia, calculado pela relação entre o valor da energia total que entra no sistema dividido pela potência produzida, permite obter o custo em energia por MWh de eletricidade produzida na UHE (ver Eq. 6).

$$CE = Y / \text{potência} \quad (6)$$

Uso da energia expressa em área territorial direta e indireta:

O uso direto e indireto da terra é um conceito semelhante ao da "pegada ecológica" desenvolvido por Wackernagel e outros (WACKERNAGEL et al. 1999, FRICKER 1998) no qual se relaciona o uso de recursos a uma área. A diferença é que quando a área é quantificada em energia, mesmo aqueles recursos não diretamente ligados à produção da eletricidade podem ser incluídos e convenientemente convertidos em um montante de energia solar necessário para gerá-los. Desta forma a demanda de área expressa em energia fornece uma comparação mais abrangente da área real necessária para uma determinada atividade (BAKSHI 2000).

A conversão dos recursos utilizados em área territorial é feita dividindo a energia total dos produtos vindos da economia pela energia total dos recursos renováveis para aquela área, que no caso referem-se ao montante de energia da chuva. Desta forma, uma demanda de área indireta é calculada (GEBER et al. 2001). A área direta é aquela ocupada pelas instalações das UHEs. Desta forma será comparada a demanda de área territorial direta e indireta das UHEs em estudo.

Indicadores propostos no presente trabalho:

Índice de Eficiência da Água de Geração:

É dada pela divisão da energia da quantidade de água responsável pela geração da energia pela energia da eletricidade gerada (ver Eq. 7). Fornece a quantidade de energia da água que passa pela turbina, necessária para cada seJ de eletricidade produzida.

$$IEAG = \text{energia da água de geração} / \text{energia da eletricidade produzida} \quad (7)$$

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.

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

Este índice mostra eficiência do uso da água de suporte na geração de energia. Quanto maior o índice, maior a eficiência no uso do recurso para a finalidade pretendida. É obtido pela divisão da energia da eletricidade produzida pela energia da água de suporte. Fornece a quantidade de energia de eletricidade gerada para cada unidade de energia de água bloqueada (ver Eq. 8).

$$\text{IEAS} = \text{energia da eletricidade produzida} / \text{energia da água de suporte} \quad (8)$$

Índice de autossuficiência em água (IASA):

Para que o sistema seja autossuficiente em termos de funcionamento é necessário que a quantidade de água que entra no sistema e que é suprida pelo ambiente local, seja pelo menos igual à quantidade de água consumida para a geração pretendida.

Caso isso não ocorra, haverá consumo da água de suporte o que pode levar, no limite, à interrupção do funcionamento, quando o desnível tornar-se insuficiente para garantir a energia potencial necessária. A água consumida é a quantidade de água que gera a eletricidade obtida na mesma janela de tempo. É calculada com base na vazão de água que passa nas turbinas no intervalo de tempo considerado. A água local é a água da chuva que cai na bacia geográfica e é calculada para o mesmo intervalo de tempo. O índice mostra o grau de dependência do sistema em relação aos recursos locais de água. Quanto maior o índice maior o grau de dependência. É calculado pela divisão da energia da água consumida pela energia da água local.

$$\text{IASA} = \text{Energia da água consumida} / \text{Energia da água local} \quad (9)$$

Índice de Transferência de Energia

É calculado pela divisão da energia da água total usada na geração pela eletricidade gerada (ver Eq.10). A água total usada é obtida pela soma da água de suporte e a água de geração. O índice mostra a parcela de energia da água total que está contida em cada unidade de energia da eletricidade produzida. É uma medida da eficiência do uso da água para a geração de eletricidade.

$$\text{ITE} = \text{energia da água total usada} / \text{energia da eletricidade produzida} \quad (10)$$

4. Resultados e discussão

Na figura 1 é apresentado o diagrama dos fluxos de energia envolvidos no processo de geração da energia elétrica. O diagrama é representativo das duas UHEs em estudo uma vez que o processo é único.

No diagrama da Figura 1 estão os fluxos em energia que mostram as interações de energia que ocorrem durante as diversas fases de produção da hidreletricidade numa UHE. Assim, o diagrama é representativo das duas unidades em estudo. À esquerda, no diagrama estão os recursos na natureza, Sol, Chuva e Vento, embora este último recurso não tenha sido considerado no trabalho. Acima estão os recursos da Economia, Materiais, Combustíveis, Serviços e Mão de Obra. À direita estão as saídas: produtos e gases de efeito estufa gerados. Nesta fase, apenas a eletricidade gerada foi quantificada. Na parte inferior do diagrama são representados os sumidouros correspondendo às parcelas perdidas de energia durante as interações que ocorrem.

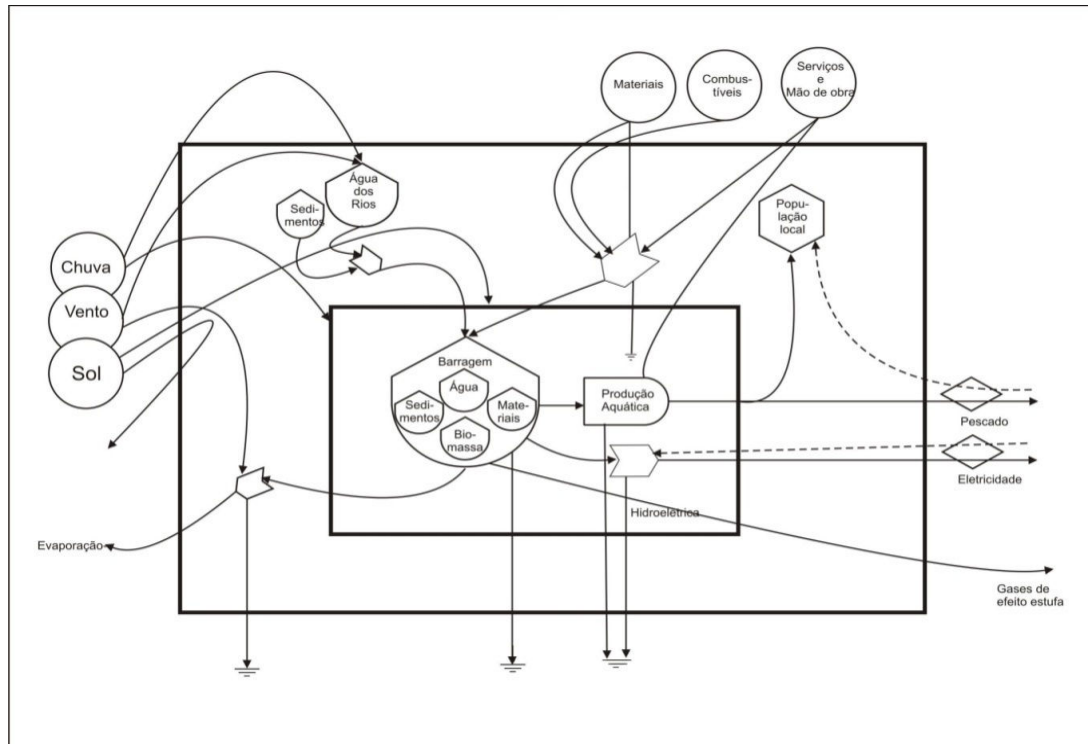


Fig.1. Diagrama dos fluxos de energia das UHEs

A Tabela 1 fornece os fluxos de energia dos insumos necessários por ano correspondente a hidroelétrica PP.

Tab.1. Fluxos anuais de Energia para produção de eletricidade na UHE PP

#	Fluxo		INPUTS valor bruto	INPUTS unidade	energia unidade	Energia (seJ/ano)
1	Aço estrutural	F	5,30 E+06	kg	6,97 E+12 ⁽¹⁾	3,69 E+19
2	Recursos da economia	F	5,42 E+07	R\$	1,18 E+13 ⁽²⁾	6,39 E+20
3	Combustíveis	F	3,54 E+13	J	1,13 E+05 ⁽³⁾	4,00 E+18
4	Concreto consumido	F	5,30 E+07	kg	1,81 E+12 ⁽⁴⁾	3,59 E+19
5	Perda de solo fértil	N	4,36 E+15	J	1,67 E+04	7,29 E+19
6	Perda de floresta	N	3,72 E+15	J	1,33 E+04 ⁽⁶⁾	4,95 E+19
7	Energia da chuva	R	5,04 E+18	J	8,12E+04 ⁽⁷⁾	4,09 E+23
8	Energia do sol	R		J	1	1,41 E+19
9	Energia do rio	R	2,58 E+17	J	3,95 E+04 ⁽⁸⁾	1,02 E+22
10	Operação/manutenção	F	3,46E+08	R\$	1,18 E+13 ⁽⁹⁾	4,08 E+21
11	Perda de sedimentos	N	1,74 E+15	J	6,30 E+04 ⁽¹⁰⁾	1,09 E+20
12	Água de suporte	R	1,43 E+15	J	3,96 E+04 ⁽¹¹⁾	5,67 E+19

Fonte das transformidades ou fatores de conversão usados na Tabela 1

(¹) PULSELLI 2007 (²) EMR 2009 (³) PULSELLI 2007 (⁴) PULSELLI 2007 (⁵) ULGIATI & BROWN 2007 (⁶) PEREIRA 2008 (⁷) ODUM 1996
 (⁸) BROWN & McCLANAHAM 1996 (⁹) EMR 2009 (¹⁰) BROWN & McCLANAHAM 1996 (¹¹) BROWN & McCLANAHAM 1996

Cálculos dos valores brutos constantes da Tabela 1

Aço estrutural estimado em 10% da massa de concreto = $0,1 \times \text{volume de concreto} \times \text{massa específica} / \text{tempo}$

Aço Estrutural = $0,1 \times 2.119.533 \text{ m}^3 \times 2500 \text{ kg} / \text{m}^3 / 100 \text{ ano} = 5,30 \text{ E}+06 \text{ kg}$

Recursos da economia

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

Custo total = $1.540.000 \text{ kW} \times \text{US\$ } 2000/\text{kW} / 100 \text{ ano} \times 1,7597 \text{ R\$/US\$} = 5,42 \text{ E}+07 \text{ R\$/ano}$

Combustíveis consumidos

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

Combustíveis = $9,30 \text{ E}+7 \text{ L} \times 9,1 \text{ E}+03 \text{ kcal/L} \times 4.186 \text{ J/kcal} / 100 \text{ ano} = 3,54 \text{ E}+13 \text{ J/ano}$

Concreto consumido

Concreto consumido = volume de concreto consumido x massa específica / tempo

Concreto consumido = $2.119.533 \text{ m}^3 \times 2500 \text{ kg} / \text{m}^3 / 100 = 5,30 \text{ E}+07 \text{ kg} / \text{ano}$

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

PerdaSF = $2250 \text{ km}^2 \times \text{E}+06 \text{ m}^2/\text{km}^2 \times 3,0 \text{ E}-01 \text{ m} \times 1,43 \text{ E}+06 \text{ g}/\text{m}^3 \times 2 \text{ E}-02 \times 5,4 \text{ kcal/g} \times 4186 \text{ J/cal} / 100 \text{ ano} = 4,36 \text{ E}+15 \text{ J/ano}$

Perda de Floresta

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

Perda F = $98,9 \text{ t} / \text{ha} \times 4000 \text{ kcal/kg} \times 1 \text{ E}+03 \text{ kg/t} \times 4.186 \text{ J/kcal} \times 2250 \text{ km}^2 \times \text{E}+02 \text{ ha} / \text{km}^2 / 100 \text{ ano} = 3,72 \text{ E}+15 \text{ J/ano}$

Energia Química da Chuva

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

Energia QC = $1779,5 \text{ mm/ano} \times 1 \text{ E}-3 \text{ m/mm} \times 4,94 \text{ E}+6 \text{ J/m}^3 \times 574.000 \text{ km}^2 \times \text{E}+6 \text{ m}^2 / \text{km}^2 = 5,04 \text{ E}+18 \text{ J/ano}$

Energia do Sol

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

Energia do Sol = $2250 \text{ km}^2 \times \text{E}+06 \text{ m}^2 / \text{km}^2 \times 5,06 \text{ E}+03 \text{ J/s} \times 3600 \text{ s/h} / \text{m}^2 \text{ dia} \times 365 \text{ dia/ano} \times (1-0,055) = 1,41 \text{ E}+19 \text{ seJ/ano}$

Energia geopotencial do rio

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

Energia GPR = $44.150 \text{ m}^3/\text{s} \times 3,15 \text{ E}+07 \text{ s/ano} \times 18,95 \text{ m} \times 1 \text{ E}+03 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 2,58 \text{ E}+17 \text{ J}$

Operação e manutenção

OpMan = Potência x tempo x custo

OpMan = $986 \text{ MW} \times 365 \times 24 \text{ h/ano} \times \text{R\$}40 / \text{MWh} = 3,46 \text{ E}+08 \text{ R\$/ano}$

Perda de sedimentos

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

PS = $44.150 \text{ m}^3/\text{s} \times 3,15 \text{ E}+7 \text{ s/ano} \times 55,3 \text{ g/m}^3 \times 0,0054 \text{ kcal/g} \times 4.186 \text{ J/kcal} = 1,74 \text{ E}+15 \text{ J} / \text{ano}$

Água de suporte

Energia da água de suporte = $V_{\text{RESERVATÓRIO}} (\text{m}^3) \times \text{densidade} (\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Gibbs} (\text{J}/\text{g}) / \text{tempo}$

Energia da água de suporte = $29 \text{ E}+09 \text{ m}^3 \times \text{E}+06 \text{ g} / \text{m}^3 \times 4,94 \text{ J/g} / 100 \text{ ano} = 1,43 \text{ E}+19 \text{ J} / \text{ano}$

A Tabela 2 fornece os valores agregados envolvendo os recursos renováveis locais (R), recursos não renováveis locais (N), materiais serviços e combustíveis comprados (F).

Tab.2. fluxos anuais de energia (seJ/ano)

	RENOVÁVEL (R)		NÃO RENOVÁVEL (N)			ECONOMIA (F)		
	PP.	Jupia	perdas	PP	Jupia		PP	Jupia
chuva	4,09 E+23	3,42 E+23	solo	7,29 E+19	1,07 E+19	aço	3,69 E+19	2,26 E+19
sol	1,41 E+19	2,07 E+18	floresta	4,95 E+19	1,32 E+19	recursos	6,39 E+20	6,44 E+20
água de suporte	5,66 E+19	7,21 E+20	sedi-mentos	1,09 E+20	1,06 E+20	combust.	4,00 E+18	1,11 E+18
						concreto	9,59 E+19	5,88 E+19
rio	1,02 E+22	1,31 E+22				op/manu t	4,08 E+21	3,66 E+21
Totais	4,19 E+23	3,55 E+23	Totais	2,31 E+20	1,30 E+20	Totais	4,85 E+21	4,39 E+21

A Tabela 3 mostra os recursos agregados e os índices calculados com base nos valores obtidos, associados ou não à metodologia de ODUM.

Tab.3. Recursos agregados e índices calculados

			PP	Jupia
1	Fluxo de recursos renováveis (seJ/ano)	R	4,19 E+23	3,55 E+23
2	Fluxo de recursos não renováveis locais. (seJ/ano)	N	2,31 E+20	1,30 E+20
3	Fluxo de energia da economia (seJ/ano)	F	4,85 E+21	4,39 E+21
4	Fluxo total de energia (seJ/ano)	Y = R + N + F	4,24 E+23	3,59 E+23
5	Porcentagem renovável da energia total	R/Y	0,99	0,99
6	Densidade de Energia (seJ/km ²)	Y/area	1,88 E+20	1,08 E+21
7	Relação de Investimento em Energia (EIR)	F / (N + R)	1,16 E-02	1,24 E-02
8	Relação de rendimento em energia (EYR)	Y/F	87,42	81,78
9	Relação de carga ambiental (ELR)	(N + F)/R	1,21 E-02	1,27 E-02
10	Índice de Sustentabilidade (ESI)	EYR/ELR	7224	6439
11	Custo em energia (seJ/MWh)	(R+N+F)/EP	1,36 E+07	1,29 E+07
12	Uso da energia expressa em área direta (km ²)	Area direta	2250	330
13	Uso da energia expressa em área indireta (km ²)	F/		
14	Relação área indireta/área direta			
15	Fração renovável do consumo dos recursos locais	R/(R+N)	0,99	0,99
16	Índice de Perda de Recursos Locais	N / R	5,51 E-04	3,70 E-04
17	Eletricidade produzida por área alagada (MWh/km ²)	EP/área direta	1,38 E+13	8,45 E+13
18	Índice de conversão em eletricidade (Mwh/seJ)		1,79 E+07	2,27 E+07
19	Índice de benefício pelo uso da água		0,77	0,57
20	Índice de eficiência pelo uso da água de suporte		75,66	879,17
21	Índice de autossuficiência em água		1,36	1,85
22	Índice de transferência de energia		1,81 E+07	2,27 E+07
23	Relação EM-dollar por MW			

Cálculos das energias para cálculos de alguns índices da Tabela 3

Para UHE PP

Energia da água de geração = vazão (m³) x densidade (g/m³) x Gibbs (J/g) x Tr(seJ/J)

= 44.150 m³/s x 1,0 E+06 g/m³ x 3,15 E+7 s/ano x 4,94 (J/g) x 4,83 E+4 seJ/J x 1,68 = 5,57 E+23 seJ/ano

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

= 986 E+06 J / s x 8760 h / ano x 3600 s / h x 1,38 E+07 = 4,29 E+23 seJ/ano

Energia da água de suporte = Volume Reservatório x densidade x Gibbs x Transformidade =

= 29 E+09 m³ x E+06 g/ m³ x 4,94 J/g x 3,96 E+04 seJ/J = 5,67 E+21 seJ

Eletricidade produzida = Potência assegurada (MW) x tempo (s)

= 986 E+06 J / s x 8760 h / ano x 3600 s / h = 3,11 E+16 MWh

Índice de conversão = 5,57 E+23 MWh/ano / 3,11 E+16 seJ/ano = 1,79 E+7 MWh / seJ

Índice de Transferência de Energia = (5,57 E+23 seJ/ano + 5,67 E+21 seJ/ano) / 3,11 E+16 seJ/ano = 1,81 E+07

Para Jupia

Energia da água de geração = vazão (m³) x densidade (g/m³) x Gibbs (J/g) x Tr(seJ/J)

= 50.130 m³/s x 1,0 E+06 g/m³ x 3,15 E+7 s/ano x 4,94 (J/g) x 4,83 E+4 x 1,68 (seJ/J) = 6,33 E+23 seJ/ano

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

= 886 E+06 J / s x 8760 h / ano x 3600 s / h x 1,29 E+07 = 3,60 E+23 seJ/ano

Energia da água de suporte = Volume Reservatório x densidade x Gibbs x Transformidade

= 32,68 E+09 m³ x E+06 g/ m³ x 4,94 J/g x 3,96 E+04 seJ/J = 7,20 E+20 seJ

Eletricidade produzida = Potência assegurada (MW) x tempo (s)

= 886 E+06 J / s x 8760 h / ano x 3600 s / h = 2,79 E+16 MWh

Índice de conversão = 6,33 E+23 MWh/ano / 2,79 E+16 seJ/ano = 2,27 E+7 MWh / seJ

Índice de Transferência de Energia = (6,33 E+23 seJ/ano + 7,20 E+20 seJ/ano) / 2,79 E+16 seJ/ano = 2,27 E+07

Pela análise da Tabela 3 nota-se que o fluxo de recursos renováveis tem duas ordens de grandeza a mais que os demais fluxos. A porcentagem renovável da energia total é praticamente o mesmo valor para ambos os empreendimentos. Embora o fluxo total de energia da UHE PP seja cerca de 20% maior que o da UHE Jupia, a densidade de empower apresenta valor mais elevado para a UHE Jupia. Pode-se concluir que a diferença de área direta dos empreendimentos seja a responsável pela inversão, já que a área da primeira UHE é quase sete vezes maior. Os valores encontrados para o índice de investimento em energia (EIR) são baixos, mas sua análise permite concluir que a UHE Jupia explora melhor os recursos da região, retornando para a economia 6,8% a mais que a UHE PP para cada seJ de recursos explorado. Também é de 6,8% a mais a diferença do retorno proporcionado pela UHE PP para cada seJ aplicado por aquela fonte. Os baixos valores encontrados para o índice de carga ambiental (ELR) acarretam altos valores do índice de sustentabilidade (ESI) já que o mesmo é obtido pela relação EYR / ELR. Os valores encontrados para as UHEs as classificam como empreendimentos que apresentam sustentabilidade de longo prazo. A redução do custo expresso em energia por MWh

apresentada pela UHE Jupuíá (5,4%) deveria ser maior já que os recursos totais aplicados em Jupuíá são 18% menores. Tal fato não ocorre porque a potência assegurada (dado usado para cálculo da eletricidade produzida) tem valor 886MW para Jupuíá e 986 MW para a UHE PP. A fração renovável dos recursos locais é idêntica para ambas UHEs pelo mesmo motivo que são coincidentes as porcentagens renováveis da energia total já analisada. O índice de perda de recursos locais é cerca de 50% maior para UHE PP mostrando que o maior uso de recursos não renováveis por essa UHE (49% a mais) acarreta maior perda dentro do período fixado para a análise (1 ano). Poderia de antemão ser esperado que a produção de eletricidade por área alagada seria maior para Jupuíá, já que essa UHE produz praticamente a mesma quantidade de eletricidade com uma área de reservatório quase 7 vezes menor. A eficiência de conversão da energia da água de geração em eletricidade é quase 27% maior na UHE Jupuíá. O mesmo índice calculado na unidade comum, o seJ, foi chamado de Índice de Benefício pelo uso da Água fornece uma vantagem 35% maior para a UHE PP. Isso pode ser explicado pelo fato de serem diferentes tanto os valores das energias da água de geração de cada UHE como os valores das transformidades das UHEs. (1,38 E+07 e 1,29 E+07 em seJ/J para UHE PP e Jupuíá respectivamente).

Os índices específicos fornecem dados importantes sobre o uso da água. Um deles é o desempenho da água de suporte. Verifica-se que o IE_{AS} de Jupuíá é cerca de 12 vezes maior que o da UHE PP ou seja Jupuíá converte em eletricidade 12 vezes mais cada seJ de água de suporte que utiliza. Outra informação de grande importância é a autossuficiência do sistema. Jupuíá tem um consumo de água 85% maior que a quantidade que chega ao local. Tal fato é crítico, especialmente em períodos de estiagem. O Índice de transferência de energia mostra que é 25% maior na UHE Jupuíá a quantidade de energia da água para gerar uma unidade de eletricidade mostrando maior eficiência na UHE PP na conversão de um tipo de energia em outro. De forma especial, neste índice, fica bem caracterizada a perda de energia que ocorre na transformação de um tipo de energia em outro. No caso da UHE PP a perda de energia tem relação de 1,81 E+07 seJ de energia da água para gerar um seJ de eletricidade. Na UHE Jupuíá a perda é 25% maior. Conforme descrito no item 2.2 a perda em quantidade é acompanhada do ganho em qualidade, por meio da concentração de energia que ocorre que se verifica na eletricidade gerada. Tal qualidade ganha vem acompanhada de um outro fator de destaque: a versatilidade. Para constatar o fato, basta considerar a quantidade de possibilidades de aplicação da eletricidade como fonte de energia, em relação às possibilidades de uso da água.

5. Conclusão

O desenvolvimento de uma política adequada para gerenciamento da água é um assunto complexo que abrange uma série de etapas que não podem ser generalizadas, pois variam em importância para cada estudo. A escassez (ou disponibilidade) do recurso varia de região para região. No Brasil, por exemplo, a maior concentração de água está na região amazônica onde se tem praticamente apenas 4% da população. A pluviosidade não é regular, em algumas regiões há longos períodos de estiagem enquanto em outras, a intensidade das chuvas causem enchentes e grande devastação. As providências necessárias para mudança desse quadro requerem grandes investimentos além de vontade política, coisas que nem sempre andam juntas. Talvez, uma das etapas mais importantes seja a escolha de uma métrica adequada que permita analisar com clareza os diversos aspectos envolvidos. A estrutura da Contabilidade em Energia parece ser mais adequada do que a Contabilidade Financeira já que não depende de mercados para dar preços. Mesmo que os valores calculados em energia tenham que ser convertidos para unidades monetárias para facilitar a comunicação e a atribuição de custos dentro do sistema econômico (BROWN et al 2011). Tal conversão é feita por meio de uma relação energia moeda designada por EMR (Emergy-money ratio). Os índices associados a essa metodologia apresentam valores bastante próximos para o estudo em questão, embora, alguns índices apresentem diferenças absolutas que variam de 6 a 12%. Desta forma, a metodologia de ODUM fornece uma avaliação mais apurada, pois permite quantificar parâmetros que muitas vezes ficam à margem da análise. Porém, como neste caso, a criação de outros índices permite destacar aspectos de interesse do estudo em desenvolvimento.

6. Referências

- ANNEEL 2002 Agência Nacional de Energia Elétrica, 2002 Atlas de Energia Elétrica no Brasil, vol. 3 - ANEEL Brasília.
- ANNEEL 2012 Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012 Banco de Informações de Geração – BIG disponível em <[HTTP://www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em fevereiro de 2012.
- BAKSHI 2000 Bakshi, B.R., A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems. *Computers & Chemical Engineering* 24 1767 - 1773
- BROWN, M.T. MCCLANAHAN 1996, T.R. EEmergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals. *Ecological Modeling* 91, p 105 – 130, 1996
- BROWN &ULGIATI 2002 Brown, M.T., Ulgiati 2002 Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production* 10 (2002) 321–334
- BROWN et al 2011 Brown,M.T.,Martinez A.,Uche, J. 2010 Emergy analysis applied to the estimation of the recovery of costs for water services under the Europea Water Framework Directive *Ecological Modelling* 221 2123 a 2132
- CBDB Comitê Brasileiro de Barragens
- CESP Companhia Energética de São Paulo
- CHEN 2009 Chen, D., Chen, J., Luo, Z. 2009 Emergy Evaluation of the Natural Value of Water Resources in Chinese Rivers *Environmental Management* (2009) 44:288-297
- CUL 2010 Cul B., Hu B, Zhai H. 2010 Employing three ratio indices for ecological effect assessment of manwan dam construction in the lancang river, China *River Research and Applications* Published online 19 May 2010 in Wiley Online Library
- FRICKER 1998 Fricker, A., 1998. The ecological footprint of New Zeland as a step for sustainability. *Futures* 30, 559 – 567.
- GEBER et al 2001 Geber, U., Bjorklund, J. 2001 The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems – a case study *Ecological Engineering* 18 (2001) 39 – 59.
- MARCHETTINI 2007 Marchettini N., Ridolfi, R., Rustici M.An environmental analysis for comparing waste management options and strategies *Science Direct Waste Management* 27 (2007) 562–571
- MELO E DURIGAN 2006 Melo, A.C.G. e Durigan, G. 2006 Carbon sequestration by planted riparianforests in Paranapanema Valley, SP, Brazil *Revista Scientia Forestalis* n. 71, p. 149-154 – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais.
- KANG 2002 Kang, D., Park,S.S. 2002 Emergy evaluation perspectives of a multipurpose dam proposal in Korea *Environmental Management* (2002) 66 293-306
- ODUM 1988 Odum, H.T., 1988 Self organization, transformity and information. *Science*, 242, 1132.
- ODUM 1994 Odum, H.T., 1994 *General and Ecological Systems. An Introduction to Systems Ecology*. University Press of Colorado, Niwot.
- ODUM 1996 Odum, H.T., 1996 . *Environmental Accounting. Emergy and Environmental Decision Making*. Wiley, New York, USA, p 370.
- ODUM 2000 Odum, H.T., Brown, M.T., Brandt-Williams, S., 2000 *Handbook of Emergy Evaluation, Folio #1*. Center for Environmental Engineering Sciences, Univ of Florida, Gainesville. Available at: <http://emergysystems.org/folios.php>
- PEREIRA 2008 Pereira, L.G. Síntese dos Métodos de Pegada Ecológica e Análise Emergética para Diagnóstico das Sustentabilidade de Países – O Brasil como um Estudo de Caso. Depto. Eng. Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas – 2008
- PORTAL BRASIL 2010 <http://www.brasil.gov.br> página acessada em 18/09/2011
- PULSELLI 2007 Pulselli, R.M et all,.Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability *Science Direct Energy and Buildings* 39 (2007) 620-28.
- PULSELLI et al. 2011 PULSELLI F.M., PATRIZI N., FOCARDI S.Calculation of the unit emergy value of water in a italian watershed *Ecological Modelling* 222(2011) 2929-2938
- RECH (2010) RECH, H. "A Formação do Setor Energético de Mato Grosso do Sul: Uma Análise à Luz da Teoria do Desenvolvimento de Celso Furtado" Tese defendida ma Universidade de São Paulo, 2010. T

TOLMASQUIM, M.T. Geração de Energia Elétrica no Brasil. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2005

ULGIATI et al. 1994 Ulgiati, S., Odum, H.T., Bastianoni, S., 1994. EMergy use, environmental loading and sustainability. an eMergy analysis of Italy. Ecological Modelling 73, 215–268.

ULGIATI/BROWN 2002 Ulgiati S. and Brown M., Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions. The case of electricity production. Journal of Cleaner Production 10 (2002) 335–348.

WACKERNAGEL 1999 Wackernagel, M., Onisto, L., Bello, P., Linares, A.C., Falfan, I.S.L., Garcia, J.M., Guerrero, C.S., 1999. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. Ecol. Econ. 29, 375 – 390

WITTMANN 2010 Wittmann D., 2010 Dissertação de <estrado Contribuição para avaliação de impactos ambientais causados pela geração de hidroeletricidade na Amazônia.