



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

**PEGADA HÍDRICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NO BRASIL – UM
ESTUDO DE CASO DA AES TIETÊ S.A.**

Fernanda França Ferreira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Heloisa Teixeira Firmo

Co-orientador: Luís Alberto da Cunha
Saporta

Rio de Janeiro

Março de 2014

**PEGADA HÍDRICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NO BRASIL – UM
ESTUDO DE CASO DA AES TIETÊ S.A.**

Fernanda França Ferreira

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL

Examinado por:

Prof^a.Heloisa Teixeira Firmo, D.Sc.,

Luís Alberto da Cunha Saporta, M.Sc.,

Prof. Paulo Renato Diniz Junqueira Barbosa, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Março de 2014

Ferreira, Fernanda França

Pegada Hídrica da geração de energia hidrelétrica no Brasil – Um estudo de caso da AES Tietê S.A./ Fernanda França Ferreira – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

viii, 93 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Heloisa Teixeira Firmo e Luís Alberto da Cunha Saporta

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Curso de Engenharia Ambiental, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 77-81.

1. Pegada Hídrica; 2. Evaporação em Reservatórios de hidrelétricas; 3. Produção de energia elétrica; 4. Análise de ciclo de vida. Firmo, Heloisa. Teixeira *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Pegada Hídrica da geração de energia hidrelétrica no Brasil – Um estudo de caso da AES Tietê S.A.

Das utopias
Se as coisas são inatingíveis... ora!
Não é motivo para não querê-las...
Que tristes os caminhos, se não fora
A presença distante das estrelas
Mario Quintana

Agradecimentos

Agradeço a minha orientadora, professora e coordenadora de curso Heloisa Firmo, quem admiro como profissional e como pessoa. Agradeço por toda ajuda em toda minha caminhada na universidade.

Ao meu co-orientador Luís Saporta, pela contribuição fundamental nesse trabalho, pelos ensinamentos diários e pela confiança.

Ao professor Paulo Renato, não convidado para a banca por acaso, quem os ensinamentos para mim foram além do quadro negro.

Ao ONS, em especial a Rogério Braga e Vinicius Forain, pelos dados enviados e pela atenção com minhas dúvidas.

Agradeço a FBDS e a AES Tietê S.A. pela possibilidade de realização desse trabalho.

A minha família, sempre presentes em minha vida, aos meus queridos amigos que o Colégio Pedro II me trouxe e aos companheiros da engenharia ambiental, amigos para a vida.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

PEGADA HÍDRICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NO BRASIL – UM ESTUDO DE CASO DA AES TIETÊ S.A.

Fernanda França Ferreira

Março/2014

Orientadores: Heloisa Teixeira Firmo

Luís Alberto da Cunha Saporta

Curso: Engenharia Ambiental

A pegada hídrica é um indicador do uso da água que permite analisar seu uso de forma direta e indireta para determinada atividade humana. O presente trabalho teve como objetivo o cálculo da pegada hídrica da produção de 1KWh da AES Tietê S.A., empresa do setor elétrico de fonte hidráulica.

Para atingir o objetivo de calcular o consumo de água para a produção de energia da AES, a metodologia do trabalho se dividiu em duas etapas: o cálculo da pegada relativa aos produtos consumidos pela empresa e a pegada relativa à evaporação dos reservatórios.

Embora a metodologia tenha sido desenvolvida para as duas etapas, os resultados relativos à primeira parcela da pegada não foram produzidos por falta de dados, no entanto, como esta primeira parcela é, como visto em revisão bibliográfica, desconsiderada em outros estudos de pegada hídrica de hidroeletricidade, os resultados foram produzidos e analisados somente para a parcela relativa à evaporação.

A hidroeletricidade corresponde a cerca de 80% do fornecimento de energia elétrica no Brasil. No âmbito do Plano Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH) as hidrelétricas são consideradas usuárias não consuntivas da água, no entanto, os resultados deste trabalho mostram que a evaporação dos reservatórios possuem valores significativos, que colocam a energia hidrelétrica entre as fontes com maior pegada hídrica.

Palavras chave: pegada hídrica, hidroeletricidade, evaporação de reservatórios, geração elétrica, AES Tietê S.A., água virtual.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

WATER FOOTPRINT OF HYDROPOWER GENERATION IN BRAZIL – A CASE STUDY OF AES TIETÊ S.A.

Fernanda França Ferreira

March/2013

Advisor: Heloisa Teixeira Firmo

Luís Alberto da Cunha Saporta

Course: Environmental Engineering

The water footprint is an indicator of water use which considers its direct and indirect use to a certain human activity. The present study aimed to calculate the water footprint of production 1KWh AES Tietê SA , an hydropower company.

To achieve the objective of calculating the consumption of water for energy production from AES, the methodology of this study was divided into two steps: the calculation of the footprint on the products consumed by the enterprise and the footprint on the evaporation from reservoirs.

Although the methodology has been developed, the results for the first step of the water footprint were not produced due to lack of data, nevertheless, this first step, as seen in literature review, is overlooked in other studies of water footprint of hydroelectricity. Therefore, the results were produced and analyzed only for the portion related to evaporation.

Hydroelectricity accounts for about 80% of the electricity supply in Brazil. Under the National Water Resources Plan (PNRH), hydropower plants are considered non-consumptive water users. However, the results of this study show that evaporation from reservoirs have significant values, placing hydropower energy among those with the highest water footprint.

Keywords: water footprint, hydroelectricity, reservoirs evaporation, electrical generation, AES Tietê SA, virtual water.

Sumário

1. Introdução.....	1
2. Motivação.....	6
3. Objetivo	7
4. Revisão Bibliográfica.....	7
4.1. Conceito de pegada Hídrica	7
4.2. Estudos de pegada hídrica no setor energético	20
4.3. Matriz de coeficientes técnicos dos recursos hídricos.....	23
4.4. Produção de energia elétrica no mundo	25
4.5. Produção de energia elétrica no Brasil	26
4.6. Evaporação de reservatórios	27
4.7. A AES Tietê S.A.	31
4.8. Caracterização da área das usinas da AES Tietê S.A	33
5. Metodologia	42
5.1. Definição de objetivo e escopo	42
5.2. Cálculo da pegada hídrica	43
5.2.1. Cálculo da pegada relacionadas aos produtos.....	44
5.2.2. Cálculo da pegada relacionada à evaporação dos Reservatórios	54
6. Resultados.....	58
7. Discussão	60
7.1. Pegadas parciais relativas aos produtos	60
7.2. Pegadas de evaporação.....	61
7.3. Comparação com demais estudos de pegada hídrica do setor hidrelétrico.....	65
7.4. Água perdida, energia perdida, soluções e viabilidade de reduzir a pegada hídrica.....	67
7.5. O papel da pegada hídrica.....	69
8. Conclusão	72
ANEXO I.....	81
ANEXO II	89

1. Introdução

A vida como um todo em nosso planeta está intimamente ligado à existência do elemento água. Essencial à vida, são inúmeros os usos que fazemos desse recurso natural, desde os mais vitais, passando pelos usos domésticos, agricultura, fabricação de produtos industriais, até os usos para transporte e recreativos.

Uma pergunta recorrente que se ouve quando se fala sobre o problema dos recursos hídricos no mundo é se a água vai acabar. A resposta é: em alguns lugares não irá acabar nunca, em outros já acabou há muito tempo. O problema de disponibilidade de recursos hídricos é local e deve ser entendido e discutido dessa forma (FIRMO, 2012).

Todo problema associado à disponibilidade hídrica é fortemente relacionado à localização da bacia hidrográfica e dos usuários de seus recursos hídricos, uma vez que não é trivial efetuar obras de transposição de águas. Apesar de ser um recurso renovável, a água, tem se tornado um bem cada vez mais escasso nos locais onde é mais requerida.

Quando se usa a água de forma consuntiva, não significa que essa desaparecerá, pois a água permanecerá dentro do ciclo e retornará sempre para algum lugar. A água é um recurso renovável, mas isso não significa que sua disponibilidade seja ilimitada. Em um determinado período, a quantidade de água que repõe as reservas subterrâneas e flui através de um rio é sempre limitada a certo volume. As águas dos rios e aquíferos podem ser usadas para irrigação, usos industriais ou domésticos. Mas durante um determinado período de tempo, não se pode consumir mais água do que a disponível (HOESKTRA, *et al.* 2011).

Diversos fatores influenciam para uma baixa disponibilidade hídrica. Efeitos naturais podem se associar a efeitos causados pelas atividades humanas, como a alta demanda e a poluição. No Brasil, a situação de estresse hídrico é observada no sertão nordestino, onde há uma baixa disponibilidade natural, e nos grandes centros urbanos e industriais, onde há uma alta demanda pelo uso e grande cargas de poluição. Todos esses fatores influenciam a disponibilidade hídrica e podem resultar em conflitos pelo uso da água.

O uso da água de um indivíduo é facilmente percebido pelo mesmo se falarmos em uso direto. O uso direto é a água utilizada para beber, cozinhar, tomar banho, lavar roupa e etc. Esses usos estão no dia a dia das pessoas e refletem na conta de água no final do mês. No entanto, cada indivíduo possui um uso indireto de água, que está

associado aos bens e serviços que ele consome. A água gasta para fabricar a cerveja que uma pessoa bebe, é uma água consumida pela mesma de forma indireta.

O uso indireto de água praticamente não é percebido. Como observado por HOEKSTRA, et al. (2011), há pouca conscientização sobre o fato de que a organização e as características de uma produção e sua cadeia de abastecimento influenciam fortemente os volumes (e as distribuições temporal e espacial) de consumo e poluição da água, que podem ser associados a um produto final de consumo. Desta forma, as pessoas encontram-se alheias à informação de um consumo de água que a elas é atribuído.

Nesse sentido, a busca por uma maior transparência nos processos e recursos naturais utilizados nos meios de produção se torna bastante interessante pelo simples fato de prover o poder da informação. Dar informação é dar a possibilidade de escolha. Cada vez mais as informações estão disponíveis às pessoas e de forma cada vez mais democrática. A possibilidade de informação faz o mundo caminhar para um cenário de escolhas conscientes.

No caminho de um mundo com informações transparentes e mais democráticas, de um mundo de escolhas conscientes, a pegada hídrica se encaixa perfeitamente nessa direção.

Durante vários anos observou-se uma evolução no sentido de construção de uma consciência ambiental na sociedade, porém hoje, ainda pouco se faz de fato em ações individuais para a redução dos impactos que causamos. Nesse contexto, o acesso à informação é uma ferramenta incentivadora para que a sociedade dê mais passos em direção ao caminho de atividades menos agressoras ao meio ambiente.

A pegada hídrica de um produto é o volume de água utilizado para produzi-lo, medida ao longo de toda cadeia produtiva. É um indicador multidimensional, que mostra os volumes de consumo de água por fonte e os volumes de poluição pelo tipo de poluição (HOEKSTRA *et al*, 2011). A pegada hídrica é uma ferramenta capaz de fornecer uma informação precisa e de fácil entendimento: o quanto de água se gasta para realizar determinada atividade.

HOEKSTRA e CHAPAGAIN (2008) mostraram que visualizar o uso oculto da água em produtos pode ajudar no entendimento do caráter global da água doce e na quantificação dos efeitos do consumo e do comércio na utilização dos recursos hídricos. O aperfeiçoamento desta compreensão pode constituir a base para um melhor gerenciamento dos recursos hídricos do planeta.

Apesar do problema de disponibilidade ser uma questão local, a água doce tem se tornado cada vez mais um recurso global, comandado pelo crescimento do comércio internacional de mercadorias. Pode-se considerar uma importação de água no caso da importação de produtos intensivos nesse recurso, porém essa importação muitas vezes não é vista claramente. Além dos mercados regionais, há também mercados globais para bens que consomem muita água, tais como produtos agrícolas e pecuários, fibras naturais e bioenergia. Como resultado, o uso dos recursos hídricos tornou-se espacialmente desconectado dos consumidores.

A utilização de água na produção de todos os produtos por nós utilizados não é uma surpresa para a maioria das pessoas, porém, quando esse conhecimento é traduzido em números, é geralmente recebido com surpresa.

Pagadas hídricas já calculadas mostram os valores para produção de bens largamente utilizados (*Tabela 1*).

Tabela 1 Pegada hídrica de produtos diversos Fonte: WFN (2008).

Produto	Pegada Hídrica	Unidade (água/produto)
Carne	15.400	litro/kg
Algodão	10.000	litro/kg
Arroz	2.500	litro/kg
Pão	1.600	litro/kg
Leite	1.000	litro/litro
Cerveja	300	litro/litro

Números como esses muitas vezes podem causar impactos, pois no geral, os consumidores não têm a percepção de que para todo processo produtivo uma grande quantidade de água é utilizada.

Para as empresas, o cálculo da pegada hídrica de seus produtos, associado a um estudo de análise de ciclo de vida, ajuda no melhor entendimento dos seus processos produtivos e de seus impactos no meio ambiente, principalmente na utilização de recursos naturais.

O consumo de água por si só não é um dado muito representativo. Gastar um metro cúbico de água na Amazônia não representa a mesma coisa que gastar um metro cúbico de água no Sertão Nordeste. Assim, quando se fala do consumo de água, deve-se ter em mente sua relação com a disponibilidade hídrica.

A pegada hídrica tem ganhado espaço no cenário internacional e essa importância reflete na elaboração de uma norma ISO específica para o cálculo de pegada hídrica. A ISO 14046 encontra-se no âmbito do comitê de análise de ciclo de vida e é uma norma que especifica princípios, requisitos e diretrizes de avaliação e comunicação da pegada hídrica. A ISO 14046 fornece requisitos e orientação para o cálculo e elaboração de relatórios de pegada hídrica como uma avaliação independente - ou como parte de uma avaliação ambiental mais ampla (BSI, 2013).

Na época da realização desse projeto, a norma ISO 14.046, estava em elaboração, por essa razão não será mais citada no texto.

O presente projeto de graduação foi desenvolvido em ocasião de estágio na FBDS – Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, baseado em um projeto da fundação em parceria com a AES Tietê. Tal trabalho encontra-se no âmbito de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), com verbas obrigatórias destinadas pelas empresas do setor elétrico, determinadas pela Lei 9.991/2000.

Esse trabalho, que diz respeito somente à pegada hídrica, foi uma parcela do projeto original, onde além dessa primeira, também foi calculada a pegada de carbono da produção de energia da AES Tietê S.A. O resultado final do projeto original foi o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de calcular a pegada ecológica da empresa. A ferramenta foi desenvolvida na linguagem *Visual Basic for Applications* e através do banco de dados preparado pela FBDS em conjunto com a AES, proporcionou à empresa a autonomia de calcular a sua própria pegada, introduzindo os dados de consumo de materiais, transporte e produção de energia.

O presente trabalho se inicia por uma revisão bibliográfica sobre o conceito de pegada hídrica, seus componentes e métodos de cálculo presentes no “Manual de Avaliação de Pegada Hídrica”, documento produzido pela Water Footprint Network e parceiros, sendo seu principal autor o professor Professor Arjen Y. Hoekstra, criador do conceito de pegada hídrica.

A revisão bibliográfica apresenta ainda um apanhado geral sobre estudos encontrados sobre pegada hídrica no setor energético, dando ênfase em dois artigos que possuem com tema a pegada hídrica de hidroeletricidade.

Em seguida, é apresentado o estudo realizado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) sob o acompanhamento técnico da Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano do Ministério do Meio Ambiente (SRHU/MMA), segundo as diretrizes emanadas do Plano Nacional de Recursos Hídricos, que originou a matriz de

coeficientes técnicos para recursos hídricos. Esse estudo possui uma iniciativa com uma ideia próxima ao conceito de pegada hídrica, ele define valores padrões de captação, consumo e geração de poluição para atividades produtivas industriais e agricultura irrigada no Brasil.

No próximo tópico da revisão bibliográfica é mostrado um breve panorama da geração de energia elétrica no Brasil e no mundo, antes da definição de termos e conceitos ligados à reservatórios de hidrelétricas e sua evaporação relacionada.

Finalizando a revisão bibliográfica, é realizada uma apresentação da AES Tietê S.A., empresa do setor elétrico, estudo de caso do presente trabalho, que busca calcular a pegada hídrica de seu produto (1 KWh). Logo em seguida é feita uma caracterização da área onde as usinas dessa empresa se encontram, do ponto de vista dos recursos hídricos.

A metodologia é totalmente baseada em HOEKSTRA *et al.* (2011). A energia elétrica de fonte hidráulica pode ser considerada um produto e com essa consideração a pegada hídrica foi calculada, de acordo com as indicações do “Manual de Avaliação de Pegada Hídrica”.

A metodologia divide-se em dois subtópicos. O primeiro apresenta a definição de objetivo e escopo, onde são esboçadas as finalidades e esclarecidos os limites do projeto. O segundo descreve a metodologia de cálculo da pegada hídrica, mostrando os fatores usados e suas formas de cálculo. Esse item é dividido em dois subitens, cálculo da pegada relacionada à produção dos produtos utilizados pela empresa de energia e cálculo da pegada relacionada à evaporação de reservatórios. Nesses subitens são especificados os métodos de pesquisa e cálculo para sua respectiva parcela da pegada.

O cálculo da parcela relativa à evaporação dos reservatórios contou com o apoio fundamental do ONS através de estudos publicados, além de ajudas pontuais com esclarecimentos de dúvidas através de contatos diretos e fornecimento de dados não disponíveis na internet.

Em resultados, apesar de não serem apresentados os valores de pegada relativa ao consumo de produtos, são mostrados os valores calculados para utilização na determinação dessa parcela da pegada, tais eles, fator de consumo de água por consumo de eletricidade e por consumo de combustíveis no transporte.

Em seguida são mostrados os resultados das pegadas relativas à evaporação dos reservatórios. Primeiramente são mostradas as pegadas por usina e em seguida a pegada total da AES Tietê S.A.

A discussão dos resultados busca primeiramente analisar os valores calculados para os fatores de consumo usados na pegada relativa aos produtos. É feita uma comparação da pegada encontrada para a hidroeletricidade da AES com as demais fontes de energia elétrica e com os valores encontrados para os combustíveis.

No item seguinte, são analisados os resultados de pegada hídrica levando em conta somente a evaporação de reservatórios e a seguir, esses valores são comparados com as pegadas dos demais estudos sobre energia hidrelétrica.

Em seguida, é feita uma análise do que representa o volume evaporado em perda energética para as usinas e para finalizar a discussão são levantados pontos quanto à importância da pegada hídrica, seu papel e pontos fracos da metodologia.

Após a discussão dos resultados é feita uma conclusão geral do trabalho.

2. Motivação

O conceito de pegada hídrica ainda é novo e pouco consolidado no meio acadêmico. É possível perceber que a quantidade de cientistas trabalhando sobre o tema é limitado e encontram-se poucos estudos sobre o assunto.

Dada à importância da questão dos recursos hídricos no Brasil e no mundo, julga-se a pegada hídrica uma ferramenta interessante e com grande capacidade de proporcionar um melhor entendimento da relação das atividades humanas com esse recurso natural.

A produção de energia elétrica é uma das bases para o desenvolvimento de um país, e vivemos no Brasil um crescente aumento na importância desse setor, onde as hidrelétricas possuem um papel fundamental. No Brasil, atualmente, mais de 80% da energia elétrica do Sistema Interligado Nacional é advindo de energia hidráulica, sendo essa a fonte base do *grid* brasileiro.

Associando a importância da hidroeletricidade no país às questões ligadas aos recursos hídricos, buscou-se realizar um trabalho inovador de cálculo de pegada hídrica tendo como produto a energia elétrica gerada de fonte hidráulica.

No banco de dados do Instituto Nacional de Propriedade Industrial, INPI, não foi encontrada nenhuma patente relativa à pegada ecológica ou pegada hídrica, assim

como em nenhum dos programas de P&D da ANEEL, o que mostra o aspecto de vanguarda do projeto em questão.

3. Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia e calcular a quantidade de água consumida para a produção de 1 Kwh de energia elétrica pela AES Tietê S.A., levando em consideração a evaporação de seus reservatórios e toda a cadeia produtiva dos produtos utilizados pela empresa no intervalo de um ano.

Objetivou-se desenvolver a metodologia para o cálculo da pegada baseada em HOEKSTRA *et al.* (2011), adaptando sua metodologia geral para o caso da hidroeletricidade.

4. Revisão Bibliográfica

4.1. Conceito de pegada Hídrica

A primeira ideia relacionada à pegada hídrica surge no ano de 1993 com o conceito de água virtual proposto por Jonh Anthony Allan (DANTAS, 2012), onde água virtual seria o volume de água incorporada ao produto, levando em conta toda sua cadeia produtiva.

DANTAS (2012) associa a introdução do conceito de pegada hídrica ao problema observado de escassez de água no Oriente Médio, onde uma solução para o problema seria a importação de água, não física, mas virtual, através da importação de produtos. Desta forma a contabilização do volume de água incorporado a cada produto seria importante para averiguar o total de água importado.

A Figura 1 mostra um mapa de importação de água virtual no mundo. É possível ver em verde os países exportadores de água e em vermelho os importadores. Os maiores exportadores de água virtual estão na América do Norte e do Sul (Estados Unidos, Canadá, Brasil e Argentina), sudeste da Ásia e Austrália. Os maiores importadores estão no norte da África e Oriente Médio, México, Japão e Coréia do Sul. As setas na figura representam os fluxos superiores a 15 Gm³/ano, sendo quanto mais grossa a seta quanto maior o fluxo.

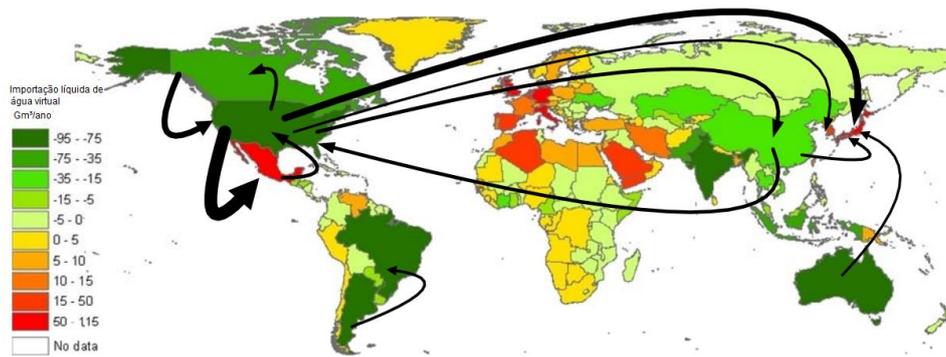


Figura 1 Balanço de água virtual e direção do fluxo de água virtual relativo às importações e exportações de produtos agrícolas e industriais no período de 1996 a 2005. Fonte: MEKONNEN e HOEKSTRA (2011b).

O conceito de pegada hídrica surge em 2002 com HOEKSTRA (2002) como uma ideia de prover um indicador de uso da água não somente com seu uso direto realizado por um consumidor ou produtor, mas também indireto.

A pegada hídrica pode ser considerada como um indicador abrangente da apropriação de recursos hídricos, vis a vis ao conceito tradicional e restrito de captação de água. Trata-se de um indicador multidimensional, que mostra os volumes de consumo de água por fonte e os volumes consumidos relativos à poluição pelo tipo de poluição (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Em algumas publicações confunde-se o termo pegada hídrica com água virtual, porém esta segunda não contempla o caráter de distinção dos usos de água utilizados que a pegada hídrica contempla. Além disso, a água virtual está relacionada a um produto, enquanto a pegada hídrica pode ser de consumidor ou produtor, por exemplo, (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

A divisão da pegada hídrica por fonte se dá pelas categorias de cores de águas criadas, sendo elas: Pegada Azul, Pegada Verde e Pegada Cinza.

A pegada azul é relativa ao consumo de água azul, essa disponível superficial e subterraneamente. A pegada verde é correspondente ao consumo de água verde, assim como a pegada cinza ao consumo de água cinza, sendo essas águas, respectivamente, a água coletada diretamente da chuva e a água usada para diluição de poluição. A Figura 2 apresenta esquematicamente as categorias em que é dividida uma pegada hídrica.

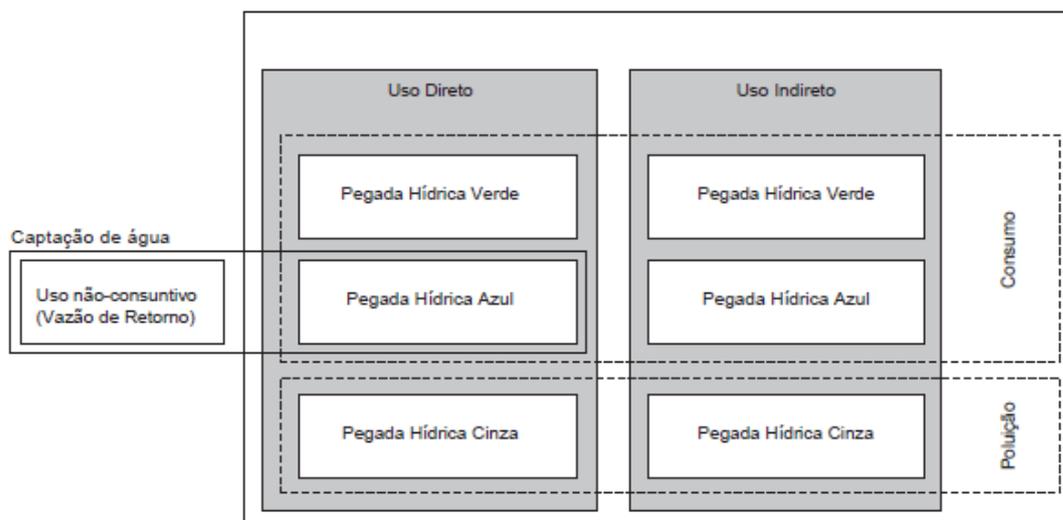


Figura 2 Representação esquemática dos componentes de uma pegada hídrica. Fonte: HOEKSTRA et al., 2011.

A consideração desses diferentes tipos de água e dos usos indiretos faz da pegada hídrica uma ferramenta que vai além de uma simples medida de captação. Além de considerar a água azul consumida, há também a contabilização da água verde e cinza. Também são descontados os volumes captados e devolvidos ao meio.

A pegada hídrica, portanto, considera apenas os usos consuntivos da água, que são os usos onde ocorre consumo da água utilizada. Assim, uma água que é captada e devolvida em igual estado, como no caso da água turbinada para geração hidrelétrica, é caracterizada como uso não consuntivo. São exemplos de usos consuntivos os volumes incorporados aos produtos, às perdas por evaporação e a água utilizada para diluição de poluentes.

Por ser calculada através do mapeamento dos processos produtivos, a pegada hídrica é uma ferramenta que possibilita quantificar e analisar como as atividades humanas ou produtos específicos se relacionam com questões de escassez e poluição da água e verificar como atividades e produtos podem se tornar mais sustentáveis sob o ponto de vista hídrico (HOEKSTRA et al., 2011).

Os mesmos autores afirmam que a pegada hídrica não é uma medida da severidade do impacto ambiental local do consumo e poluição da água. O impacto ambiental local depende da vulnerabilidade do sistema hídrico e do número de consumidores e poluidores que fazem uso do mesmo sistema. A pegada hídrica se limita a uma medida volumétrica de consumo. No entanto, o conhecimento do valor da pegada hídrica fornece informações espacial e temporalmente específicas sobre como a água é apropriada para os vários propósitos humanos. Elas podem alimentar a discussão

sobre o uso e a alocação equitativos e sustentáveis da água, além de formar uma boa base para a avaliação dos impactos ambientais, sociais e econômicos.

Os estudos de pegada hídrica podem ter vários propósitos e podem ser aplicados em diferentes contextos. Cada um deles requer uma análise específica e permitirá alternativas diferentes em relação às suposições usadas. Pode-se avaliar a pegada hídrica de diferentes entidades, por isso, é mais importante começar especificando qual a pegada hídrica de interesse (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Segundo esses autores, o cálculo da pegada hídrica pode se dar para:

- pegada hídrica de uma etapa do processo
- pegada hídrica de um produto
- pegada hídrica de um consumidor
- pegada hídrica de um grupo de consumidores
 - pegada hídrica de consumidores em um país
 - pegada hídrica de consumidores em um município, província ou outra unidade administrativa
 - pegada hídrica de consumidores em uma bacia hidrográfica
- pegada hídrica dentro de uma área delimitada geograficamente
 - pegada hídrica dentro de um país
 - pegada hídrica dentro de um município, província ou outra unidade administrativa
 - pegada hídrica dentro de uma bacia hidrográfica
- pegada hídrica de um negócio
- pegada hídrica de um setor de negócios
- pegada hídrica da humanidade como um todo

A escolha do foco a ser usado no estudo de pegada hídrica, assim como o nível de detalhe das informações requeridas, depende do objetivo do estudo. Caso o objetivo seja a conscientização, valores médios nacionais podem ser usados como dados de entrada. No caso de um estudo para definir pontos críticos e guiar ações, os dados usados precisam ser mais específicos para o caso estudado, utilizando dados primários.

Uma avaliação completa da pegada hídrica, segundo HOEKSTRA *et al.* (2011) consiste em quatro fases:

1. Definição de objetivos e escopo.
2. Contabilização da pegada hídrica.

3. Avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica.
4. Formulação de respostas à pegada hídrica.

A fase da contabilização da pegada hídrica é a fase em que os dados são coletados e as quantificações são desenvolvidas. O escopo e o nível de detalhe na contabilização dependem das decisões feitas na fase anterior, de definição de objetivos.

HOEKSTRA *et al.* (2011) afirma que após a fase de contabilização, o próximo passo, a fase de avaliação da sustentabilidade, busca contabilizar a pegada hídrica de uma perspectiva ambiental, social e econômica. Na fase final, são formuladas opções de respostas, estratégias ou políticas.

Ainda segundo os mesmos autores um estudo de pegada hídrica não precisa obrigatoriamente conter todos os passos em apenas um estudo. O mesmo pode ser feito em fases, onde a primeira etapa pode contemplar apenas a definição de objetivos, escopo e contabilização. A avaliação da sustentabilidade e a discussão sobre respostas podem ser feitos em estudos posteriores. Além disso, este modelo de quatro fases subsequentes é, na prática, mais uma orientação do que uma diretiva estrita.

No intuito de definir e direcionar uma metodologia para o cálculo da pegada hídrica, a Water Footprint Network, seus parceiros, e cientistas da Universidade de Twente, na Holanda - desenvolveram o “Manual de Avaliação da Pegada Hídrica” (Water Footprint Assessment). Esse manual define pegada hídrica e seus componentes e especifica as normas para seu cálculo e avaliação. Os subitens 4.1.1 e 4.1.2 são totalmente baseados nesse manual, HOEKSTRA *et al.* (2011).

4.1.1. Definição de objetivos e escopo

O primeiro passo para um estudo de pegada hídrica é a definição de seus objetivos e escopo. No planejamento da contabilização de uma pegada hídrica devemos ser claros e explícitos em relação aos ‘limites de inventário’. Estes se referem a “o que incluir” e “o que excluir” da contabilidade e devem ser escolhidos de acordo com o propósito da contabilização.

Algumas perguntas podem guiar o planejamento e as definições de objetivo e escopo:

- Considerar a pegada hídrica azul, verde e/ou cinza?
- Onde truncar a análise retroativa ao longo da cadeia produtiva?
- Qual nível de resolução espaço-temporal?

- Que período de dados?
- Para consumidores e empresas: considerar a pegada hídrica direta e/ou indireta?
- Para países: considerar a pegada hídrica dentro do país e/ou a pegada hídrica do consumo nacional; considerar a pegada hídrica interna e/ou externa do consumo nacional?

Todas essas perguntas devem ser respondidas para uma boa definição dos objetivos e dos métodos que serão usados no estudo da pegada.

No caso das diferentes cores de pegadas, geralmente a água azul possui um maior custo de oportunidade que a água verde, assim, pode-se decidir por uma cálculo de pegada onde apenas a água azul seja contabilizada. De outra forma, se o intuito é focar sobre a poluição causada por determinada atividade, pode-se optar por contabilizar somente a pegada cinza. No caso de o estudo objetivar uma visão global do uso da água as três pegadas devem ser contabilizadas.

O truncamento da análise da cadeia produtiva depende do nível de detalhe que se quer dar ao projeto. A recomendação é que se contabilize todos os processos significativos para o resultado da pegada. No entanto a definição de “processo significativo” pode variar de acordo com os objetivos do estudo, dependendo se o objetivo é buscar uma visão mais geral ou um foco apenas nas parcelas mais importantes.

A resolução espaço-temporal é classificada em diferentes níveis como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 Níveis de resolução espaço-temporal de uma pegada hídrica. Fonte: HOEKSTRA et al., 2011.

	Resolução espacial	Resolução temporal	Fonte de dados necessários sobre uso da água	Uso típico das contabilizações
Nível A	Média global	Anual	Literatura e banco de dados disponíveis sobre o consumo e poluição de água típicos, por produto ou processo.	Ações de conscientização, identificação preliminar dos componentes que mais contribuem para a pegada hídrica total; desenvolvimento de projeções globais do consumo da água.
Nível B	Nacional, regional ou de bacia	Anual ou mensal	Como no caso acima, mas o uso de dados específicos nacionais, regionais ou de bacias.	Identificação preliminar da dispersão e variabilidade espaciais; base de conhecimento para identificação de áreas críticas e decisões sobre alocação de água.
Nível C	Pequena bacia ou gleba	Mensal ou diária	Dados empíricos ou (se não forem diretamente mensuráveis) melhores estimativas do consumo e poluição da água, especificados por local e durante o ano.	Base de conhecimento para a realização de uma avaliação de sustentabilidade de uma pegada hídrica; formulação de uma estratégia para reduzir a pegada hídrica e os impactos locais associados.

Observação: Os três níveis podem ser distinguidos para todas as formas de contabilização de pegada hídrica (por exemplo, contabilização de produto, nacional, corporativa).

A escolha do nível a ser usado depende, assim como os demais fatores, do objetivo do estudo. O nível A de resolução, o menos rico em detalhes, pode ser usado para um projeto de fim de tomada de conhecimento da pegada em linhas gerais e da identificação dos processos envolvidos mais intensivos em consumo de água. O nível B pode fornecer base para identificar pontos críticos no nível de bacia hidrográfica, podendo auxiliar de melhor forma a tomada de decisão relativa à alocação do uso da água. O nível C utiliza dados precisos sobre as fontes usadas no produto estudado. A resolução mínima temporal é um mês e análises de variações interanuais farão parte da avaliação. A contabilização é baseada nas melhores estimativas reais do consumo e poluição locais de água, preferencialmente verificadas *in loco*.

Como a disponibilidade hídrica dos recursos naturais e sua demanda são variáveis ao longo do tempo, o período de dados utilizados para o cálculo da pegada hídrica deve ser claramente explicitado, pois essa escolha terá forte influência no resultado. Pode-se escolher calcular as pegadas hídricas de um ano em particular ou um número específico de anos, mas alternativamente pode-se escolher calcular a pegada hídrica em um ano médio, considerando o clima existente.

4.1.2. Contabilização da Pegada Hídrica

A principal questão que nos leva a iniciar um projeto de pegada hídrica é: qual é a quantidade de água doce disponível durante um determinado período e qual é a apropriação real dessa quantidade por parte do homem durante este período? O cálculo da pegada hídrica fornece os meios para responder a segunda metade dessa questão.

As apropriações do homem se dão pelos usos dos volumes de água destinados a suas atividades domésticas, agrícolas e industriais. Esses consumos não podem exceder a taxa de reposição natural dos recursos hídricos.

Os usos de retirada de volumes de água do ciclo hidrológico são referentes aos consumos de água azul e verde. A pegada hídrica verde se refere ao uso humano do fluxo que se evapora da superfície terrestre, resultado, em sua maior parte, do cultivo agrícola ou da produção florestal. A pegada hídrica azul se refere ao uso consuntivo do fluxo de escoamento; isto é, a captação do escoamento da bacia, na medida em que este fluxo não retorna à bacia na forma de vazão de retorno.

A Figura 3 mostra um esquema das pegadas verde e azul e sua interação com o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.

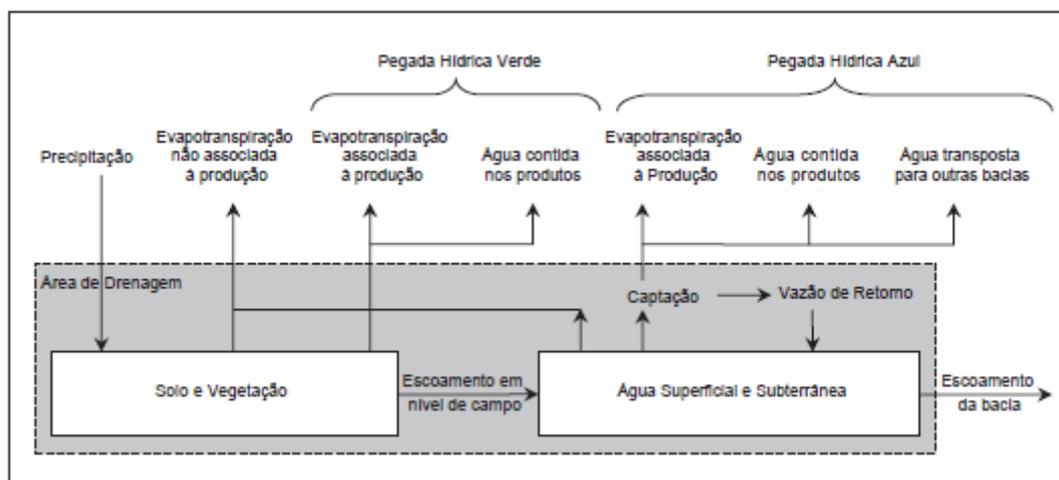


Figura 3 Balanço hídrico e pegadas azul e verde. Fonte: HOEKSTRA et al., 2011.

O fluxo total de escoamento de um recurso hídrico possui um limite de retirada e uma capacidade limitada para assimilar efluentes. Não presente no esquema da Figura 3, o uso da água cinza é igualmente importante. Ela não é caracterizada por um consumo onde há retirada de volume do sistema, porém é considerada um consumo pela apropriação da capacidade de assimilação de efluentes.

A base para todo o cálculo de pegada hídrica é o cálculo de uma etapa do processo. A pegada hídrica é a agregação de todas as etapas relevantes do processo de produção de um produto e conseqüentemente de um consumidor ou empresa. A Figura 4 mostra um esquema onde fica explícita a pegada de um processo como base para todos os tipos de cálculo de pegada.

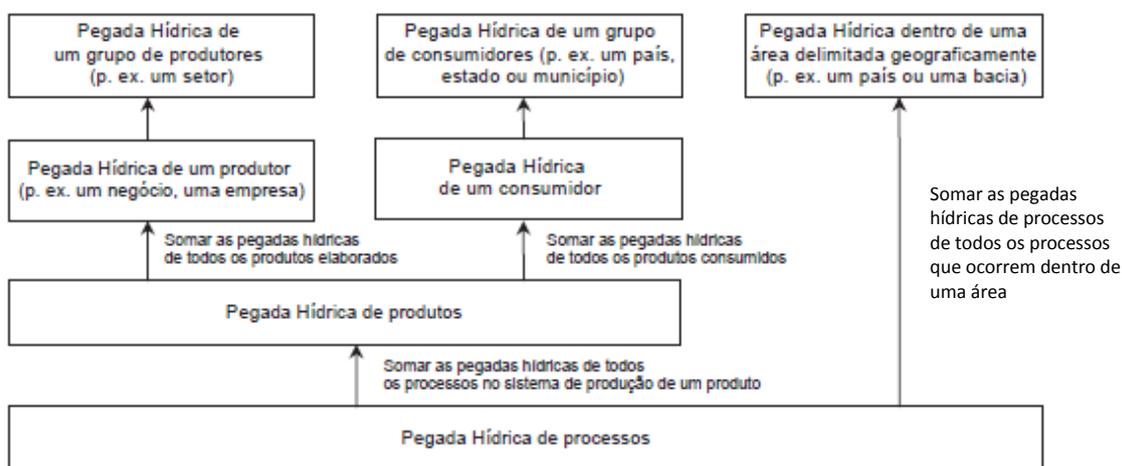


Figura 4 Pegadas hídricas de processo como a unidade básica para todas as outras pegadas hídricas. Fonte: HOEKSTRA et al., 2011.

As pegadas hídricas de produtos finais (de consumo) podem ser somadas sem que haja dupla contabilidade. Isto se deve ao fato de que as pegadas hídricas dos processos são sempre e exclusivamente alocadas em um único produto final ou, quando um processo contribui para mais de um produto final, a pegada hídrica de um processo é dividida entre os diferentes produtos finais.

4.1.2.1. Pegada hídrica azul

A pegada azul corresponde ao uso consuntivo de água azul, ou seja, a água consumida de um corpo hídrico de fonte de água doce superficial ou subterrâneo.

O uso consuntivo da água azul deve estar enquadrado em um dos casos a seguir:

1. Quando a água evapora;
2. Quando a água é incorporada ao produto;
3. Quando a água não retorna à mesma bacia hidrográfica, mas sim escoar para outra bacia ou para o oceano;
4. Quando a água não retorna no mesmo período; por exemplo, quando é retirada em um período de seca e retorna em um período de chuvas

Geralmente, o fator evaporação é o mais significativo nos processos produtivos, que é a realidade da hidroeletricidade, caso tratado nesse estudo. Porém todos os consumos significantes devem ser contabilizados.

Tendo em vista que apesar de a água ser um recurso natural renovável, seu uso é limitado à disponibilidade em determinado período de tempo em determinado local, ou seja, é importante se ter em questão os diversos possíveis usos dos recursos hídricos e que a utilização para um determinado fim implica a não utilização para outro. Levando em conta a escolha que deve ser feita, a pegada azul surge como uma ferramenta que possibilita a informação, facilitando o processo de escolha.

A pegada hídrica azul de uma etapa do processo pode ser calculada da seguinte forma:

$$PH_{proc,azul} = \text{Evaporação da água azul} + \text{Incorporação da água azul} + \text{Vazão de retorno perdida [volume/tempo]}$$

O último componente se refere à porção do fluxo de retorno que não está disponível para o reuso dentro da mesma bacia hidrográfica, no mesmo período de retirada, seja por ter retornado à outra bacia (ou por ter sido lançado no mar) ou por ter retornado em outro período.

4.1.2.2. Pegada hídrica verde

A água verde é a água de precipitação sobre o continente. A pegada hídrica verde está associada ao uso consuntivo dessa água, ou seja, a água precipitada que não entra no ciclo natural, não escoando ou repondo águas subterrâneas, mas é armazenada no solo ou permanece temporariamente na superfície do solo ou na vegetação. Essa água que permanece no solo não necessariamente será totalmente aproveitada pelas plantas, sendo água produtiva, pois uma parte irá evaporar, sendo contabilizada como perda e também entrando no cálculo da pegada hídrica.

A pegada hídrica verde é o volume da água da chuva consumido durante o processo de produção. Isto é particularmente relevante para os produtos agrícolas e florestais (grãos, madeira etc.), correspondendo ao total de água da chuva que sofre evapotranspiração (dos campos e plantações) mais a água incorporada nos produtos agrícolas e florestais colhidos.

A fórmula para calcular a pegada hídrica verde em uma etapa do processo é a seguinte:

$$PH_{proc, verde} = \text{Evaporação de água verde} + \text{Incorporação de água verde} \\ [\text{volume/tempo}]$$

A distinção da pegada verde da pegada azul é um fator importante, pois os custos e impactos de uso das águas superficiais e subterrâneas para a produção são bastante diferentes dos impactos e custos do uso da água da chuva.

A contabilização da pegada verde é geralmente mais complexa do que a contabilização da pegada azul. O consumo da água verde na agricultura pode ser medido ou estimado através de um conjunto de fórmulas empíricas ou através de um modelo de cultura adequado para a estimativa da evapotranspiração, com base nos dados de clima, solo e as características da cultura.

4.1.2.3. Pegada hídrica cinza

A pegada hídrica cinza de uma etapa do processo é um indicador do grau de poluição da água que pode estar associado à etapa do processo. É definida como o volume de água necessário para assimilar a carga de poluentes baseado nas concentrações em condições naturais e nos padrões ambientais.

A ideia da quantificação da poluição por meio de um volume de água torna-se bastante interessante, podendo agregá-la à contabilização total da pegada e possibilitando a comparação entre diferentes poluentes.

Outra visão interessante é que no caso da geração de poluição o uso de água para diluição de poluentes pode ser considerada como um uso consuntivo, pois uma vez que um determinado volume é utilizado para diluição, não poderá ser usado novamente, já que o poluente se encontra no limite permitido pelos padrões vigentes. O conceito de pegada hídrica cinza surgiu do reconhecimento de que o tamanho da poluição hídrica pode ser expresso em termos de volume de água necessário para diluir os poluentes de forma que eles se tornem inócuos.

A pegada hídrica cinza é calculada pela divisão da carga poluente (L , em massa/tempo) pela diferença entre a concentração do padrão ambiental de qualidade da água para um determinado poluente (a concentração máxima aceitável c_{max} , em massa/volume) e sua concentração natural no corpo d'água receptor (c_{nat} , em massa/volume).

$$PH_{proc, cinza} = L / (c_{max} - c_{nat}) [\text{volume/tempo}]$$

A concentração natural em um corpo d'água receptor corresponde à concentração que ocorreria sem os impactos das atividades humanas sobre o recurso hídrico. Para

substâncias de origem humana que naturalmente não ocorrem na água, $c_{nat} = 0$. Quando não conhecidas as concentrações naturais, mas consideradas baixas, considerar $c_{nat} = 0$, para simplificação. No entanto, isso resultará em uma pegada hídrica cinza subestimada quando c_{nat} não for realmente igual à zero.

Um conceito análogo é encontrado em ANA (2013), a vazão de diluição. Conforme estabelecido pela lei 9433/97, os usos da água considerados significativos estão sujeitos a outorga por parte do órgão competente. No caso da outorga para lançamento de efluentes, o cálculo da vazão de água utilizada é feito através do conceito de vazão de diluição.

$$Q_{dil} = Q_{ef} \cdot \frac{(C_{ef} - C_{perm})}{(C_{perm} - C_{nat})}$$

Q_{ef} é a vazão do efluente, C_{ef} é a concentração do poluente, C_{perm} é a concentração estabelecida pelo enquadramento¹ do rio e C_{nat} é a concentração natural do poluente no manancial.

A vazão da qual o usuário efetivamente se apodera para diluição de efluentes é denominada vazão indisponível, e corresponde à soma da vazão de diluição com a vazão de lançamento. Esta é a vazão que é comparada com a disponibilidade hídrica, demais demandas consuntivas e demais vazões indisponibilizadas do mesmo parâmetro de qualidade para a concessão da outorga (ANA, 2013).

Uma dúvida passível de surgir nesse momento é por que utilizar como base a concentração natural do rio e não sua concentração real do poluente, tanto no conceito de vazão de diluição quanto na pegada hídrica. O cálculo é feito dessa forma porque os dois fatores são indicadores da capacidade de assimilação utilizada. A capacidade de assimilação de um corpo d'água receptor é função da diferença entre a concentração máxima permitida e a concentração natural de uma substância. Se comparássemos a concentração máxima permitida com a concentração real de uma substância, teríamos a capacidade de assimilação remanescente, que, obviamente, varia o tempo todo, em resposta ao nível real de poluição em um determinado momento.

Embora os padrões de qualidade da água em seu estado natural sejam definidos nas legislações nacionais ou estaduais, definidos por bacia e/ou corpo d'água no âmbito da legislação nacional ou ainda através de acordos regionais, não existem padrões

¹ Enquadramento de rios é um instrumento da lei 9433/97 que estabelece níveis máximos de concentração de poluentes no curso d'água para atingir determinado objetivo ambiental definido pelos usos do manancial.

para todas as substâncias e para todos os lugares. O mais importante, obviamente, é especificar quais padrões de qualidade da água e quais concentrações naturais estão sendo adotados no cálculo de uma pegada hídrica cinza.

4.1.2.4. Pegada Hídrica de um produto

A pegada hídrica de um produto é definida como o volume total de água doce que é utilizado direta ou indiretamente em seu processo produtivo. Sua estimativa é feita com base no consumo e na poluição da água em todas as etapas da cadeia produtiva.

O método de cálculo de pegada de um produto é único e não possui grandes variações quanto ao tipo de produto, seja ele derivado dos setores agrícola, industrial ou de serviços. A pegada hídrica de um produto é subdividida nas componentes verde, azul e cinza, como já descrito nas seções anteriores.

No cálculo de uma pegada é sempre importante definir a unidade funcional. Ela pode ser reportada em diferentes unidades dependendo da intenção do projeto. No caso dos produtos agrícolas a pegada hídrica é geralmente expressa em termos de m^3/ton ou litros/kg. Em muitos casos, quando os produtos agrícolas podem ser medidos em unidades a pegada hídrica também pode ser expressa como volume de água por unidade. No caso de produtos industriais a pegada hídrica pode ser expressa em $m^3/\$$ ou pelo volume de água por unidade. No caso do produto ser a energia elétrica o resultado será reportado em volume por unidade de energia, sendo litros/Kwh ou m^3/GJ , por exemplo.

Para estimar a pegada hídrica de um produto primeiramente é preciso entender a forma como ele é produzido. Por esta razão é preciso identificar seu sistema de produção. Um sistema de produção consiste em etapas de processos sequenciais. Considerando que muitos produtos necessitam de diversos insumos acontece de múltiplas etapas de processos precederem a etapa seguinte. Neste caso não teremos uma cadeia linear de etapas do processo, mas sim uma árvore de produto. A construção dessa árvore é feita considerando os processos que estão ligados à produção do produto final, que são averiguados através de uma análise de ciclo de vida do produto.

Para calcular a pegada hídrica de um produto é preciso esquematizar o sistema de produção em um número limitado de etapas interligadas do processo. Além disso, se desejarmos ir além de uma análise superficial baseada em médias globais, será necessário especificar as etapas no tempo e no espaço, o que significa rastrear a origem (dos insumos) do produto. As circunstâncias da produção e as características

do processo apresentarão variações de acordo com cada lugar; assim, o local da produção influenciará o tamanho e a cor da pegada hídrica. Além disso, poder-se-á mapear geograficamente a pegada hídrica de um produto final, ou seja, mais uma razão para manter a rastreabilidade dos locais.

Neste ponto, o problema de truncamento mencionado no item 4.1.1 é particularmente relevante, pois este trabalho inclui a necessidade de simplificações e suposições sobre os fatores que são relevantes ou não nos cálculos.

4.2. Estudos de pegada hídrica no setor energético

São encontrados na bibliografia alguns estudos de pegada hídrica de fontes energéticas.

Um cálculo da pegada hídrica para a energia advinda de biomassa é realizado por GERBENS-LEENES *et al.* (2008) para os países: Holanda, Estados Unidos, Brasil e Zimbábue. Nesse estudo são calculadas pegadas para a energia de biomassa de diversas fontes, como soja, cana de açúcar, óleo de palma, entre outros. O resultado final mostra uma média de todas essas fontes, gerando um valor de pegada para a energia de biomassa do país.

GERBENS-LEENES *et al.* (2008) referência em seu estudo GLEICK (1993) e GLEICK (1994), que calcula valores de pegada hídrica para diversas fontes de energia. Na Tabela 3 são mostrados os valores calculados por GLEICK e os valores de pegada para biomassa calculados em GERBENS-LEENES *et al.* (2008).

Tabela 3 Pegada Hídrica de fontes de energia primárias (m³/GJ)

Fonte de Energia Primária	Pegada Hídrica Média (m³/GJ)
Energia eólica ^a	0
Energia nuclear ^a	0,1
Gás Natural ^a	0,1
Carvão ^a	0,2
Energia Térmica Solar ^a	0,3
Petróleo ^a	1,1
Hidroeletricidade ^b	22
Biomassa Nova Zelândia ^c	24
Biomassa EUA ^c	58
Biomassa Brasil ^c	61
Biomassa Zimbábue ^c	143
Biomassa (média Nova Zelândia, EUA, Brasil e Zimbábue)	72

Fontes:^a GLEICK, 1994 apud GERBENS-LEENES et al., 2008

^B GLEICK, 1993 e SHIKLOMANOV, 2000 apud GERBENS-LEENES et al., 2008

^C GERBENS-LEENES et al. 2008

Tais valores serão usados posteriormente no cálculo da pegada hídrica relativo ao consumo de energia elétrica nos processos produtivos.

Alguns outros estudos relativos a pegadas hídricas relacionadas à energia foram feitos, como em GERBENS-LEENES et al. (2012), onde o estudo se refere ainda à bioenergia, porém nesse caso com enfoque em transportes, fazendo uma projeção para 2030.

Quando se fala sobre exemplos de estudos de pegada hídrica para o tema energia é possível observar que a maior parte dos estudos trata de bioenergia. Isso se dá pelo uso intensivo de água que as culturas requerem para sua produção. Assim, a biomassa é uma das fontes energéticas com maiores valores de pegada hídrica.

Embora a energia hidrelétrica seja entendida como também grande consumidora de água por HOEKSTRA et al. (2011), os estudos de pegada hídrica desse tipo de fonte são bem mais escassos. Dois estudos relacionados à pegada hídrica de energia elétrica de fonte hidráulica foram encontrados e serão discutidos a seguir.

O primeiro estudo, MEKONNEN e HOEKSTRA (2012) calculam os valores de pegada hídrica para 35 usinas espalhadas pelo mundo. A escolha das usinas a serem estudadas foi arbitrária e principalmente limitada pela disponibilidade de dados. Esse estudo limita-se a contabilizar a pegada azul da hidroeletricidade, somente relacionada à evaporação de reservatórios.

Primeiramente foram estimados valores de evaporação durante o período de um ano para os reservatórios selecionados. O segundo passo foi calcular a pegada hídrica baseada na evaporação anual e na quantidade de energia produzida.

A pegada hídrica média considerando as 35 usinas do estudo representa um valor de 39 m³/GJ. No entanto, pode ser observado que a faixa de variação da pegada das usinas é bastante larga, indo de 0,3 m³/GJ, para a hidrelétrica de San Carlos, na Colômbia, até 846 m³/GJ, para a hidrelétrica de Akosombo-Kpong, em Gana.

Das 35 usinas escolhidas para o estudo, 8 estão localizadas em território brasileiro. O resultado da pesquisa para essas usinas é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 Resultados de MEKONNEN e HOEKSTRA (2012) para as hidrelétricas brasileiras presentes no estudo.

Usina	Estado	Pegada hídrica (m ³ /GJ)
Sobradinho	Bahia (CHESF)	399
São Simão	Minas Gerais/ Goiás (cemig)	40,8
Itumbiara	Minas Gerais/ Goiás (furnas)	52,5
Tucuruí	Pará (Eletronorte)	49,5
Itaipu	Paraná/Paraguai	7,6
Jaguari	São Paulo (cesp)	14,4
Marimbondo	São Paulo/ Minas Gerais (furnas)	38,3
Estreito	São Paulo/ Minas Gerais (furnas)	70,6
Média		84,1

Assim como o Brasil, a Nova Zelândia tem como principal fonte de energia elétrica a hidráulica. Segundo EDF (2010) *apud* HERATH *et al.* (2011), 57% do total da geração no país vem da hidroeletricidade. Essa grande participação da fonte impulsionam pesquisas para o melhor entendimento de suas relações com o meio ambiente.

Em HERATH *et al.* (2011), os autores fazem uma comparação entre três metodologias de cálculo de pegada hídrica para hidroeletricidade, tendo como estudo de caso a energia de fonte hidráulica produzida na Nova Zelândia.

O primeiro método utilizado por HERATH *et al.* (2011), é o método de MEKONNEN e HOEKSTRA (2011), citado anteriormente, que considera apenas o uso consuntivo da água, sendo esse considerado como a evaporação total da superfície do reservatório artificial. A pegada da energia elétrica foi calculada pela divisão da evaporação total pelo total de energia produzido.

O segundo método, assim como o primeiro, considera somente o uso consuntivo da água, no entanto levando em consideração a mudança de uso da terra causada pelo reservatório. O uso da água considerado no método dois é o volume correspondente à evaporação líquida dos reservatórios. Nesse método, a pegada hídrica é calculada pela diferença entre a evaporação real e a evapotranspiração real, dividida pela produção de energia.

O terceiro método utiliza o balanço hídrico líquido do reservatório, considerando todas as entradas e saídas. Assim, não somente a evaporação é levada em conta, mas

também a precipitação no reservatório. Esse método muda a base do cálculo da pegada hídrica, que nos outros métodos é o uso consuntivo.

O estudo leva em consideração todas as grandes usinas do país, que juntas correspondem à 95% da geração hidrelétrica da Nova Zelândia (HERATH *et al.*, 2011).

Os resultados dos três métodos mostraram valores que variaram de 1,55 a 6,05 m³/GJ. Isso representa uma pegada hídrica para a energia hidrelétrica da Nova Zelândia inferior ao valor dado como média mundial de 22 m³/GJ por GERBENS-LEENES *et al.* (2009). Os resultados das pegadas para as diferentes usinas foram também bastante diversos entre si em todos os métodos usados.

HERATH *et al.* (2011) conclui que o terceiro método usado possibilita um melhor entendimento dos impactos da geração hidroelétrica sobre os recursos d'água. Como esse método leva em conta a evaporação e a precipitação sobre o reservatório, por vezes a pegada hídrica pode ser negativa, enquanto os métodos um e dois darão sempre valores positivos, uma vez que levam em conta somente as perdas. Os resultados do método três, como esperado, foram os menores valores encontrados, enquanto os do método um foram os maiores.

Em ambos os estudos, HERATH *et al.*, (2011) e MEKONNEN e HOEKSTRA (2011), os resultado levam em conta no cálculo da pegada apenas a evaporação dos reservatórios, não considerando pegadas associadas à compra de produtos utilizados no processo de produção em atividades de manutenção e operação das usinas. Também não foram consideradas as variações de área dos reservatórios ao longo do ano.

4.3. Matriz de coeficientes técnicos dos recursos hídricos

A preocupação com as questões relacionadas aos recursos hídricos é um movimento mundial que é acompanhado por algumas iniciativas no Brasil.

O setor industrial brasileiro possui uma crescente participação das suas diferentes tipologias na demanda total de água e do impacto causado pelo lançamento de efluentes nas bacias hidrográficas. O papel da água no setor industrial ainda é um assunto pouco estudado no Brasil. Tal fato pode ser explicado pela limitada disponibilidade de dados sobre o uso da água no setor, que constitui obstáculo para a efetiva caracterização das indústrias em termos de uso de água e aporte de poluentes às bacias (FERES *et al.*, 2005 *apud* CNI, 2013).

A necessidade do conhecimento dos setores industriais mais intensivos e os menos intensivos no uso da água para que se possa definir ou antever as externalidades do

processo de desenvolvimento, motivou o desenvolvimento de um estudo segundo as diretrizes emanadas do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), sobre a retirada, consumo e geração de efluentes pelas atividades industriais e agricultura irrigada. O estudo, denominado de Matriz de Coeficientes Técnicos para Recursos Hídricos no Brasil, foi iniciado em 2009 e finalizado em 2011 (CNI, 2013).

Trata-se de um estudo estratégico que visa subsidiar ações de planejamento e gestão de recursos hídricos, tendo-se em vista a dificuldade existente no Brasil para quantificação diagnóstica e prospectiva do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), referente à identificação dos coeficientes técnicos setoriais de uso dos recursos hídricos, diferenciados por setores produtivos e por tipo de processo tecnológico adotado (idem).

A matriz é dividida em categorias de acordo com as tipologias de atividades econômicas com maior relevância no cenário nacional, adotando a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE 2.0) para identificá-las.

Foram usados como fontes de dados os segmentos da indústria, as associações, a Confederação Nacional da Indústria (CNI), os programas e projetos de uso racional da água, os comitês de bacia hidrográfica, as agências de bacias, os órgãos gestores de recursos hídricos, as publicações técnicas e científicas, entre outros.

O resultado do estudo é apresentado na forma de Matriz de Coeficientes Técnicos de retirada de água, consumo e lançamento de efluentes pelas atividades industriais, por unidade de produto (m^3 /unidade de produto). São apresentados os coeficientes para 76 atividades industriais extrativistas e de transformação, correspondentes a 272 classes da CNAE 2.0 (CNI, 2013)

A Figura 5 mostra um exemplo de matriz para algumas atividades.

Codigo CNAE 2.0				Denominação	Coeficientes técnicos de uso da água (m³/unidade da atividade)				Observações
Seção	Divisão	Grupo	Classe		Unidade da atividade	Retirada	Consumo	Efluente	
B				INDÚSTRIAS EXTRATIVAS					
	05			EXTRAÇÃO DE CARVÃO MINERAL					
		05.0		Extração de carvão mineral	t produzida	6,25	1,25	5,00	
	07			EXTRAÇÃO DE MINERAIS METÁLICOS					
		07.1		Extração de minério de ferro	t produzida	1,05	0,18 – 1,00	0,87	
		07.2		Extração de minerais metálicos não-ferrosos					
			07.21-9	Extração de minério de alumínio	t produzida	3,42	2,91	0,51	Adotou-se para captação e efluente a mesma relação da classe de minerais metálicos não ferrosos.
			07.22-7	Extração de minério de estanho	t produzida	6,25	1,25	5,00	
			07.23-5	Extração de minério de manganês	t produzida	6,25	1,25	5,00	
			07.24-3	Extração de minério de metais preciosos	t produzida	0,14 – 1,78	0,05 – 1,67	0,14 – 0,37	Água adicional retirada devido a mineração: 0,11 a 2,49 m³/tonelada
			07.25-1	Extração de minerais radioativos	t produzida	6,25	1,25	5,00	
			07.29-4	Extração de minerais metálicos não-ferrosos não especificados anteriormente	t produzida	1,86	1,58	0,28	

Figura 5 Exemplo de matriz de coeficientes técnicos de recursos hídricos brasileiros. Fonte: CNI, 2013.

A matriz de coeficientes técnicos de recursos hídricos possui a essência da ideia bastante próxima à da pegada hídrica e pode ser considerada a realização de um estudo nesse sentido, porém possuem algumas diferenças fundamentais.

A matriz mostra os volumes de água retirados, consumidos e os efluentes gerados, porém não possui o caráter informativo quanto à origem da água consumida, como é encontrada na pegada hídrica. A organização desses coeficientes técnicos em uma matriz foi um estudo para o caso brasileiro para tipos de indústria de forma geral. Ela foi desenvolvida desta forma porque encontra-se adaptada para fornecer dados que facilitem o gerenciamento de questões ligadas aos usos múltiplos das águas. Captura, consumo e geração de poluição são as informações necessárias para esse fim.

A pegada hídrica possibilita uma informação mais precisa e possui uma maior abrangência em sua metodologia. A pegada hídrica pode ser calculada para uma atividade genérica, como é o caso dos coeficientes presentes na matriz, porém possui a possibilidade de ser bem mais específica, como calcular a pegada da atividade de determinada empresa, produto, consumidor, território.

4.4. Produção de energia elétrica no mundo

A Figura 6 apresenta a configuração no cenário mundial da produção de energia elétrica. Trata-se de uma média mundial fornecida pela IEA. É possível observar que a maior parte da energia produzida mundialmente provém de combustíveis fósseis, o que pode contribuir de forma significativa para o agravamento do aquecimento global.

O carvão é a principal fonte e representa mais de quarenta por cento da produção de energia no mundo, seguido pelo gás natural (22%), segundo dados da IEA.

A participação da fonte hidráulica é de 16% na média mundial de produção de eletricidade e é a fonte considerada renovável com maior participação na matriz total. As demais fontes consideradas renováveis, biomassa e eólica, têm participação de apenas 2 e 1%, respectivamente.

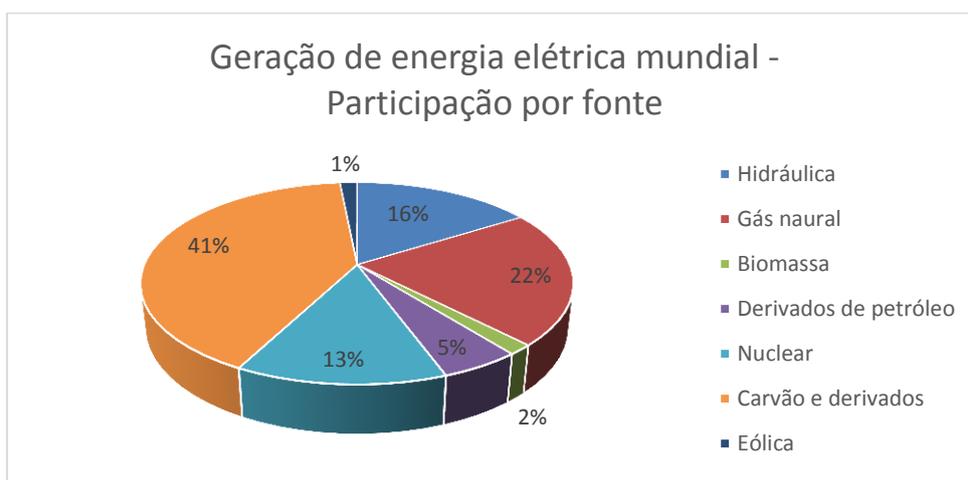


Figura 6 Participação das diferentes fontes na produção de energia elétrica no mundo – Fonte: IEA média de 2008, 2009 e 2010.

Nos anos de 2009 e 2010 os dados do IEA apresentam dentro da classe “outros” as gerações de origem geotérmicas, solar, eólica, biomassa e calor, que somam respectivamente 3,3 e 3,7 do total de produção nesses anos. Sendo biomassa e eólica as principais fontes da classe “outras”, para efeito de simplificação dos cálculos, foi assumido metade do percentual para cada uma destas fontes para o cálculo da média.

4.5. Produção de energia elétrica no Brasil

O Brasil é o nono país em geração de energia elétrica do mundo, com uma participação de 2,6% do total mundial em 2010. No entanto, é o segundo país em geração hidroelétrica, com 11,9% da participação mundial, atrás apenas da China, responsável por 21% da produção em 2010, segundo dados EPE (2013).

Foram produzidos no Brasil 403,4 TWh de energia hidrelétrica em 2010 (EPE, 2013). A matriz energética brasileira é constituída principalmente de fonte hidráulica, o que faz da nossa matriz uma das mais limpas do mundo quando se fala em emissão de gases estufa, por se tratar de uma fonte renovável. Porém, o consumo de água desta fonte é de grande importância devido à expressiva evaporação dos reservatórios.

A energia elétrica gerada no Brasil, apesar de ser em sua maior parte de origem hidráulica possui contribuição de outras fontes. A distribuição da participação das fontes na geração de energia elétrica no Brasil pode ser observada na Figura 7.

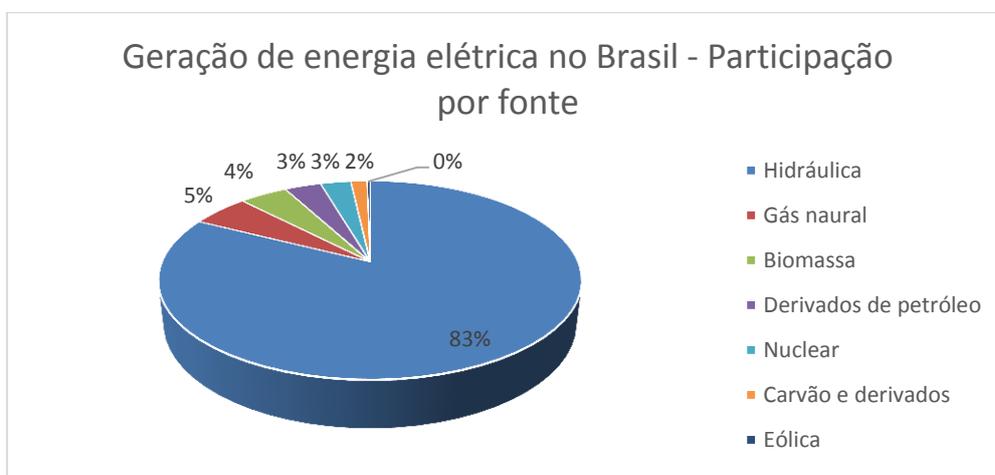


Figura 7 Participação das diferentes fontes na produção de energia elétrica no Brasil – Fonte: BEN, média de 2008, 2009 e 2010.

4.6. Evaporação de reservatórios

A evaporação faz parte dos consumos mais expressivos nos processos de grande parte dos produtos comercializados hoje em dia (HOEKSTRA *et al.*, 2011). No que diz respeito a reservatórios, esses valores podem ser extremamente altos dependendo de diversos fatores.

Para entender melhor sobre a evaporação de reservatórios, alguns conceitos devem ser discutidos. Nesta seção são trazidos definições e conceitos relativos aos fenômenos naturais de evaporação e evapotranspiração, aos reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos, bem como a relação entre esses elementos.

4.6.1. Evaporação

Sabe-se que a evaporação é o processo físico no qual um líquido passa ao estado gasoso. Quando tratado no contexto da meteorologia, o termo evaporação diz respeito à mudança da água no estado líquido para vapor devido à radiação solar e aos processos de difusão molecular e turbulenta.

Além da radiação solar, as variáveis meteorológicas que interferem na evaporação, particularmente de superfícies livres de água, são a temperatura do ar, vento e pressão de vapor (ONS, 2004). No entanto, esses demais fatores estão de alguma forma relacionados com a radiação solar, sendo esse o parâmetro fundamental para a evaporação.

A evaporação pode ser classificada como potencial e real. A evaporação potencial é o valor máximo que pode ser evaporado de uma região se na realidade não houvesse influências externas que alteram a linearidade e a constância do fenômeno, como características físicas próprias de cada lago ou reservatório, diferenças climáticas e regionais (idem). Evaporação Real ou Evaporação de Lago leva em consideração todas as características que não são analisadas pela Evaporação Potencial e que afetam e alteram as estimativas finais, tais como profundidade do lago, variações de temperatura e umidade do ar, vento, etc., por essa razão para fins de estudos e análises práticas, usa-se o conceito de Evaporação Real.

4.6.2. Evapotranspiração

Transpiração é o processo em que a água que passa pelo interior da planta se transforma em vapor e é transferida para a camada de ar próxima à superfície da mesma, através de seus estômatos (Pereira *et al.*, 2002 *apud* Fernandes, 2006).

A evapotranspiração é a combinação dos processos de evaporação e transpiração, definindo a perda total de água do sistema solo-planta para a atmosfera (Fernandes, 2006). Esse fator é de fundamental importância no balanço hídrico de uma bacia.

Diversos fatores como a umidade do solo, a umidade do ar e o sistema radicular das plantas influenciam na evapotranspiração do sistema. O solo, as plantas e a atmosfera podem ser considerados como componentes de um sistema fisicamente inter-relacionado e dinâmico, no qual os vários processos de fluxo estão interligados como os elos de uma corrente (ONS, 2004).

Os conceitos de Evapotranspiração real e Potencial são definidos em ONS (2004):

“ Evapotranspiração Potencial (ETP): quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de um superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água (Penman, 1956)

*· Evapotranspiração Real (ETR): quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial ($ETR \leq ETP$) (Gangopadhyaya *et al.*, 1968).”*

4.6.3. Evaporação Líquida (EL)

A evaporação líquida representa a diferença entre a evaporação real do reservatório e a evapotranspiração real da bacia hidrográfica no local do reservatório antes da sua implantação (ONS, 2004). Em outras palavras, a evaporação líquida representa o volume de água que evapora menos o que evaporaria em um regime natural do curso d'água sem a interferência da barragem.

O conhecimento do valor dessa evaporação é necessário para reconstituição das séries de vazões naturais dos aproveitamentos hidrelétrico e para uso nas simulações energéticas. Esta informação é importante para todos os locais simuláveis, existentes e planejados (ONS, 2004).

4.6.4. Evaporação Líquida nas Usinas Hidrelétricas

As perdas nos reservatórios a título de evaporação constituem em importante fase do ciclo hidrológico, por isso têm um papel fundamental, tanto nos estudos de planejamento, como na operação dos sistemas existentes.

Nos estudos de planejamento da operação e da expansão energética, os dados de evaporação são utilizados de duas formas principais: nos estudos de simulação de operação de reservatórios e nos estudos para obtenção das séries de vazões naturais nos locais de aproveitamentos hidrelétricos. Nestes processos, referentes à quantificação do montante perdido por evaporação e evapotranspiração nos reservatórios dos aproveitamentos hidrelétricos, este montante se traduz de forma linear em perda energética nas usinas hidrelétricas. Daí a importância e a preocupação em se desenvolver bons, e cada vez mais precisos, estudos aplicáveis a todas as usinas em operação do SIN – Sistema Interligado Nacional (ONS, 2004).

Neste contexto, o ONS desenvolveu um estudo que inclui os aproveitamentos das bacias hidrográficas dos rios Tocantins, São Francisco, Paranaíba, Grande, Tietê, Paranapanema, Iguaçu e Paraná, onde os valores de evaporação líquida foram determinados.

Os valores de evaporação líquida calculados pelo estudo são apresentados em milímetros (mm) para cada mês do ano. A evaporação representada em mm multiplicada pela área de interesse apresenta o valor evaporado em volume. As evaporações líquidas apresentadas como resultado do estudo foram usadas mais à frente para o cálculo do volume líquido evaporado em cada reservatório.

4.6.5. Parâmetros de um reservatório

Para entendermos a dinâmica da operação de um reservatório de um aproveitamento hidrelétrico, alguns termos técnicos utilizados precisam ser definidos. Tais termos estão presentes em Eletrobrás (2003).

“Nível Máximo Normal no Reservatório - Nível de água máximo no reservatório para fins de operação normal da usina. Corresponde ao nível que limita a parte superior do volume útil.

Nível Mínimo Normal no Reservatório - Nível de água mínimo no reservatório para fins de operação normal da usina. Corresponde ao nível que limita a parte inferior do volume útil.”

Esses níveis são cotas que representam as diferenças verticais em metros entre a superfície referida do reservatório e a superfície do oceano.

O volume útil corresponde ao volume máximo normal menos o volume mínimo normal do reservatório. Representa o volume que de fato possui o potencial de ser usado energeticamente pelo aproveitamento.

4.6.6. Polinômios – Relação cota – volume - área

O ONS, em seu site disponibiliza polinômios de Cota X Volume e Cota x Área dos principais reservatórios brasileiros. Esses polinômios permitem, a partir do volume do reservatório em determinado momento, conhecer sua cota e área associadas.

A construção de tais polinômios se dá através de campanhas de campo onde são colhidas informações de batimetria dos reservatórios com auxílio de sondas de medição. A partir das medições de um determinado número de seções, que variam de acordo com a área da represa, são criados mapas com curvas de nível para o fundo dos reservatórios.

O resultado da campanha de campo é a geração de curvas cota – volume a partir do modelo numérico de terreno obtido. As curvas cota-volume podem ser geradas calculando-se o volume de aterro para cada cota num intervalo de 1 em 1 m a partir da cota mínima. De posse desses dados de cota e volume, uma planilha eletrônica pode efetuar o ajuste da curva polinomial de forma a se encontrar a melhor correlação (MARCATO, 2010).

Este polinômio corresponde a uma equação com cinco parâmetros a_{PCV} , b_{PCV} , c_{PCV} , d_{PCV} e e_{PCV} . Cada reservatório terá seu conjunto de parâmetros de acordo com suas características físicas.

Com este polinômio, tendo o dado de volume em determinado tempo é possível o conhecimento de sua cota correspondente com relação ao nível do mar. As unidades das grandezas presentes no polinômio são hm^3 para o volume e m para a cota (MARCATO, 2010).

$$COTA = a_{PCV} + VOL \cdot b_{PCV} + VOL^2 \cdot c_{PCV} + VOL^3 \cdot d_{PCV} + VOL^4 \cdot e_{PCV}$$

O mesmo procedimento é utilizado para o traçado das curvas de cota – área, obtendo uma curva polinomial onde a entrada é a cota e a saída a área, sendo a_{PCA} , b_{PCA} , c_{PCA} , d_{PCA} e e_{PCA} os parâmetros próprios de cada reservatório.

O polinômio cota- área tem a seguinte forma, sendo as unidades hm^3 para o volume e Km^2 para a área.

$$ÁREA = a_{PCA} + COTA \cdot b_{PCA} + COTA^2 \cdot c_{PCA} + COTA^3 \cdot d_{PCA} + COTA^4 \cdot e_{PCA}$$

Os parâmetros dos polinômios cota – volume e cota – área são disponibilizados pelo ONS para os reservatórios do SIN e serão usados neste trabalho na etapa a seguir.

4.7. A AES Tietê S.A.

A AES Tietê S.A. é a terceira maior companhia privada brasileira de geração de energia. Com um parque gerador formado por nove usinas hidrelétricas e três pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), a AES Tietê atua no Brasil desde 1999 com a geração e a comercialização de energia elétrica. Todas as suas usinas hidrelétricas e PCHs estão localizadas no Estado de São Paulo. (AES Tietê 2013)

A capacidade instalada da AES Tietê é de 2.658 MW, o que corresponde a 50% da energia necessária para o abastecimento de uma cidade como São Paulo por um ano. Seu parque gerador é responsável por 10,7% da capacidade instalada do Estado de São Paulo e 2,2% da nacional. A empresa possui contrato de concessão vigente até 2029, podendo ser renovável por mais 30 anos.

A Figura 8 apresenta o mapa do Estado de São Paulo com a localização da usinas as AES Tietê S.A.

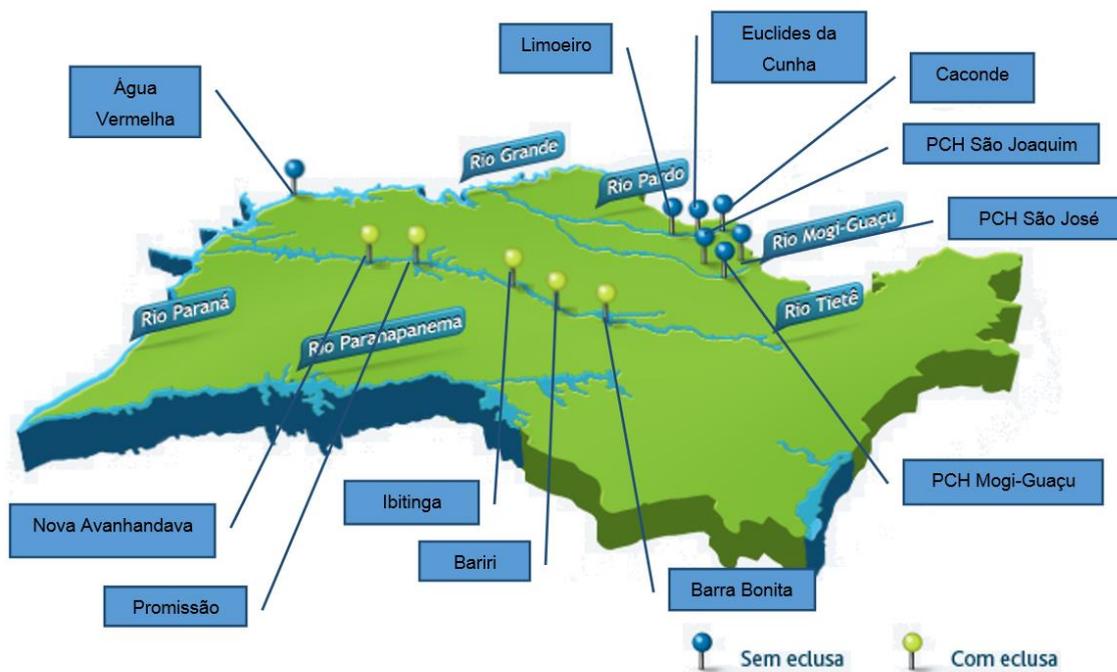


Figura 8 Localização das Usinas da AES Tietê S.A. (AES Tietê 2013) (alterada)

A Tabela 5 apresenta a lista de todas as usinas da AES com sua potência instalada.

Tabela 5 Potência Instalada das Usinas AES Tietê S.A. (AES Tietê S.A. 2008)

Usina	Potência Instalada (MW)
Água Vermelha	1396,2
Bariri	136,8
Barra Bonita	140,76
Caconde	80,4
Euclides da Cunha	108,8
Ibitinga	131,5
Limoeiro	32,2
Nova Avanhandava	347,4
Promissão	264
PCH Mogi-Guaçu	7,2
PCH São Joaquim	3
PCH São José	4

Água Vermelha é a maior hidrelétrica da companhia, respondendo sozinha por mais de 50% da energia assegurada² total da empresa. Está localizada no Rio Grande, na

² A energia assegurada de um sistema é a máxima produção de energia que pode ser mantida quase que continuamente pelas usinas hidrelétricas ao longo dos anos, simulando a ocorrência de cada uma das milhares de possibilidades de seqüências de vazões criadas estatisticamente, admitindo certo risco de não atendimento à carga, ou seja, em determinado percentual dos anos simulados, permite-se que haja racionamento dentro de um limite considerado aceitável pelo sistema (ANEEL, 2005).

divisa entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais. As usinas de Barra Bonita, Bariri, Ibitinga, Promissão e Nova Avanhandava estão localizadas no rio Tietê, que corta o estado no sentido leste-oeste, com 1.100 quilômetros de extensão. Caconde, Euclides da Cunha e Limoeiro estão no rio Pardo (AES Tietê, 2013).

4.8. Caracterização da área das usinas da AES Tietê S.A

A rede hidrográfica paulista é estruturada por duas grandes áreas de drenagem, constituídas a partir do divisor de águas da Serra do Mar. Assim, por um lado, tem-se a área de drenagem do Rio Paraná, cujos afluentes principais são os rios Tietê e Paranapanema, e, de outro, um conjunto de bacias cujos rios deságuam no litoral, de que são exemplos os rios Paraíba do Sul e Ribeira de Iguape (CRH-SP, 2013).

As usinas da AES estão todas contidas no território do estado de São Paulo, e estão dentro da bacia do rio Paraná, conforme divisão hidrográfica adotada pelo IBGE e pela ANA.

A gestão dos recursos hídricos do estado de São Paulo é dividida em Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs), que constituem unidades territoriais “com dimensões e características que permitam e justifiquem o gerenciamento descentralizado dos recursos hídricos” (art.20 da Lei Estadual 7663 de 30/12/1991 apud CRH-SP 2006) e, em geral, são formadas por partes de bacias hidrográficas ou por um conjunto delas, que não podem ser consideradas como bacias hidrográficas. Associados a cada uma das UGRHs, existem comitês de bacias estaduais, excetuando as UGRHs 20 e 21 que possuem conjuntamente um único comitê.

Atualmente, o estado possui 22 unidades. A Figura 9 mostra as unidades organizadas por regiões hidrográficas. Em destaque as unidades que englobam os reservatórios da AES.

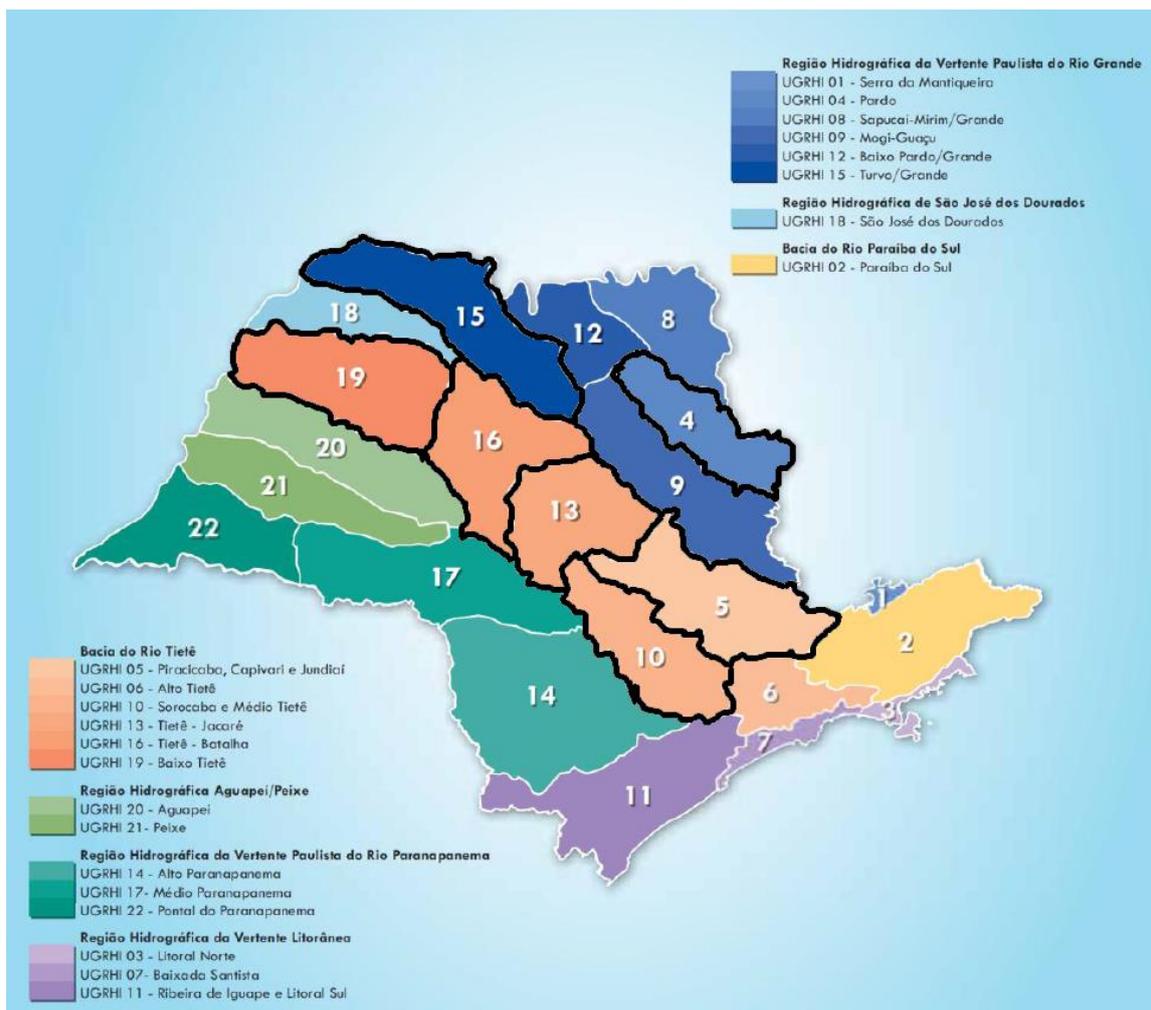


Figura 9 Mapa das Bacias/Regiões Hidrográficas de São Paulo. Fonte CRH-SP, 2013.

A Tabela 6 mostra para cada uma das usinas da AES, sua localização, UGRHI e comitê de bacia correspondente.

Tabela 6 Características correspondentes a cada usinas. Fonte: SIGRH, 2014.

Reservatório	Rio	Comitê de bacia	UGRHI
Água Vermelha	Rio Grande	Rio grande (interestadual) e Rios Turvo e Grande	UGRHI 15 em SP e UPGRH – GD 8 em MG
Promissão	Rio Tietê	Tietê – Batalha e Baixo Tietê	UGRHI 19 e 16
Ibitinga	Rio Tietê	Tietê-Jacaré	UGRHI 13
Bariri	Rio Tietê	Tietê-Jacaré	UGRHI 13
Nova Avanhadava	Rio Tietê	Baixo Tietê	UGRHI – 19
Barra Bonita	Rio Tietê	Piracicaba, Capivari e Jundiá (interestadual) e CBH dos rios Sorocaba e médio tietê	UGRHI 5 e UPGRH 10 em SP
Euclides da Cunha	Rio Pardo	Rio grande (interestadual) e Pardo	UGRHI 4

Caconde	Rio Pardo	Rio grande (interestadual) e Pardo	UGRHI 4
Limoeiro	Rio Pardo	Rio grande (interestadual) e Pardo	UGRHI 4

As usinas da AES Tietê estão concentradas nas Regiões Hidrográficas do Rio Tietê e na Região Hidrográfica da Vertente Paulista do Rio Grande. Encontram-se dentro da área de abrangência de 7 Comitês de bacia estaduais do estado de São Paulo e uma do estado de Minas Gerais.

Algumas usinas além de estarem em território vigente de comitês estaduais também encontram-se sobre área de comitês interestaduais, como a usina Barra Bonita, que encontra-se em área de abrangência do Comitê interestadual Piracicaba, Capivarí e Jundiá. Já as usinas Água Vermelha, Euclides da Cunha, Caconde e Limoeiro, encontram em área referente ao Comitê interestadual do Rio Grande.

O Tietê é o rio de maior extensão do Estado de São Paulo e sua bacia apresenta área de aproximadamente 73.400 km², percorrendo apenas terras paulistas, no sentido leste-oeste, em uma extensão de aproximadamente 1.100 km. Nasce nas escarpas da Serra do Mar, a 22 km do litoral, no município de Salesópolis e sua foz localiza-se no rio Paraná, na fronteira com o Estado de Mato Grosso do Sul, no município de Itapurá (CRH-SP, 2013).

Parte do Rio Grande constitui-se em um divisor natural dos territórios dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, e sua bacia hidrográfica abrange área de drenagem de 143.437,79 km², dos quais 57.092,36 km² (39,8%) encontram-se no território do Estado de São Paulo e 86.345,43 km² (60,2%) no Estado de Minas Gerais, onde se localiza sua nascente, no município de Bocaina. Percorrendo cerca de 1.300 km, deságua no Rio Paraná entre os municípios de Santa Clara do Oeste (SP) e Carneirinho (MG) (idem).

Nessa seção serão levantados dados da situação dos recursos hídricos das UGRHIs onde as usinas da AES estão presentes. Serão apresentadas características como urbanização, disponibilidade hídrica, demanda de usos, qualidade das águas e conflitos pelo uso das águas.

4.8.1. Dinâmica demográfica

O estado de São Paulo como um todo possui taxa de urbanização de 95,9% em 2010 e uma densidade demográfica de 166,1 hab/km² (CRH-SP, 2013). A taxa de urbanização do estado de São Paulo é compatível com às regiões mais desenvolvidas

do mundo, cerca de 40 milhões de pessoas estão vivendo em áreas urbanas e seu território. A densidade demográfica geral do estado não é muito grande, no entanto, a concentração de pessoas no estado de São Paulo está bastante localizada e encontra-se nas suas três regiões metropolitanas (São Paulo, Campinas e Baixada Santista) e em seus dois polos industriais (Ribeirão Preto e São José dos Campos).

A Tabela 7 mostra a caracterização das UGRHI que englobam os reservatório das AES quanto a população, área de drenagem e principais rios.

Tabela 7 Área de drenagem de população por UGRHI. Fonte: CRH-SP, 2013.

UGRHI	Área de drenagem (km ²) 2006	População (hab) 2011
04	8.993	1.106.667
05	14.178	5.073.194
10	11.829	1.842.805
13	11.779	1.479.207
15	15.925	1.232.939
16	13.149	511.421
19	15.588	752.852

Dentro das UGRHI que englobam as usinas da AES a com maior densidade demográfica é a 05-PCJ, que é igualmente uma das maiores densidades demográficas do estado.

4.8.2. Disponibilidade hídrica

A situação da disponibilidade hídrica das UGRHIs onde estão localizadas as usinas da AES é bastante diversa. A UGRHI 16 é abundante em recursos hídricos, sendo a disponibilidade hídrica de 6000 m³/hab.ano.

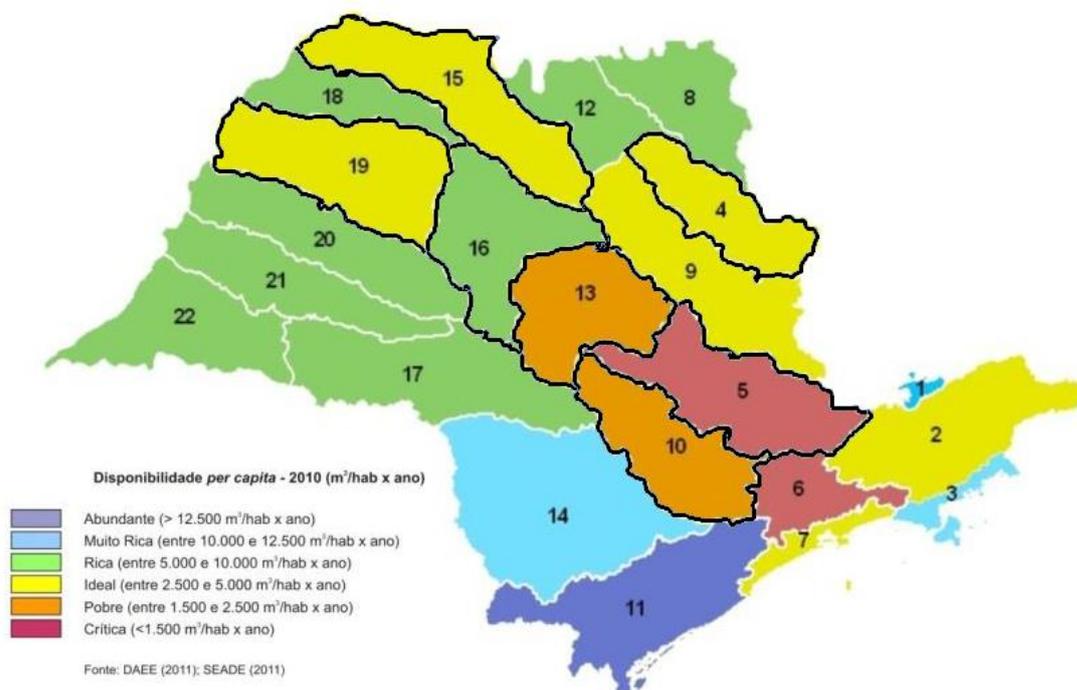


Figura 10 Disponibilidade per capita de água superficial - $Q_{médio}$ em relação à população total. Fonte: CRH- SP, 2013.

As UGRHI 4, 15 e 19 possuem disponibilidade ideal, considerando o volume de água médio disponível ($Q_{médio}$), como disponível em PERH (2013), e a quantidade de habitantes nos territórios das bacias. As disponibilidades dessas UGRHI são, respectivamente, 4000, 3100 e 4700 m³/hab.ano.

As UGRHI que apresentam os menores índices de disponibilidade *per capita* são também as que concentram maior população. Dentre as que abrangem usinas da AES estão: 05-PCJ, em situação classificada com crítica (1.069 m³/hab.ano) e 10-SMT (1.831 m³/hab.ano) em situação de atenção, evidenciando a correlação entre a disponibilidade hídrica e a dinâmica demográfico-social do Estado de São Paulo (CRH-SP, 2013).

A UGRHI 05-PCJ, especificamente, tem a sua disponibilidade superficial seriamente afetada devido à transposição de águas de suas bacias hidrográficas para regiões adjacentes. Parte da água de suas cabeceiras (31 m³/s) é destinada à UGRHI 06-AT, para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (CRH-SP, 2013).

4.8.3. Demanda pelo uso da água

A fração outorgada para os diferentes usos dos recursos hídricos nas UGRHI é heterogênea e reflete a dinâmica socioeconômica do Estado. A UGRHI 05 apresenta uma grande demanda para uso urbano e industrial. Já as UGRHI 13 e 15 possuem grandes demandas de uso rural. A Tabela 8 mostra as demandas outorgadas por UGRHI e por tipo de uso da água

Tabela 8 Demandas pelo uso da água. Fonte CRH-SP, 2013.

UGRHI	Demanda Urbana (m ³ /s)	Demanda industrial (m ³ /s)	Demanda rural (m ³ /s)	Demanda para outros usos (m ³ /s)
04	4,647	2,546	4,790	0,107
05	49,735	8,032	1,828	0,370
10	5,426	3,164	2,286	0,027
13	3,503	6,306	6,487	0,107
15	3,938	3,959	7,373	0,016
16	1,065	1,024	6,762	0,005
19	0,687	3,452	1,271	0,799

4.8.4. Demanda versus disponibilidade

Essa avaliação é feita a partir de um balanço entre a vazão disponível e demanda por seu uso. A vazão de base utilizada como vazão disponível é a $Q_{7,10}$ ³, que é a vazão utilizada para orientar a outorga de direito de uso da água no estado de São Paulo segundo a Lei estadual 9034/94.

O balanço entre a demanda superficial e a disponibilidade mínima superficial no Estado como um todo é classificada como Bom em 2010. O caso crítico identificado entre as UGRHIs correspondentes as usinas da AES é a 05-PCJ, onde a demanda de recursos representa 117% da $Q_{7,10}$. A UGRHI 10-SMT em 2010, manteve-se na categoria Atenção (43%), apesar de ter sido classificado como crítico em anos anteriores. Isso devido a uma redução no volume outorgado para captações superficiais. As outras UGRHI classificadas na categoria Atenção em 2010 foram: 13-TJ (44%) e 15-TG (40%).

³ $Q_{7,10}$ é a vazão mínima média de 7 dias consecutivos, estimada para um período de retorno igual a 10 anos (CBH PCJ, 2008)

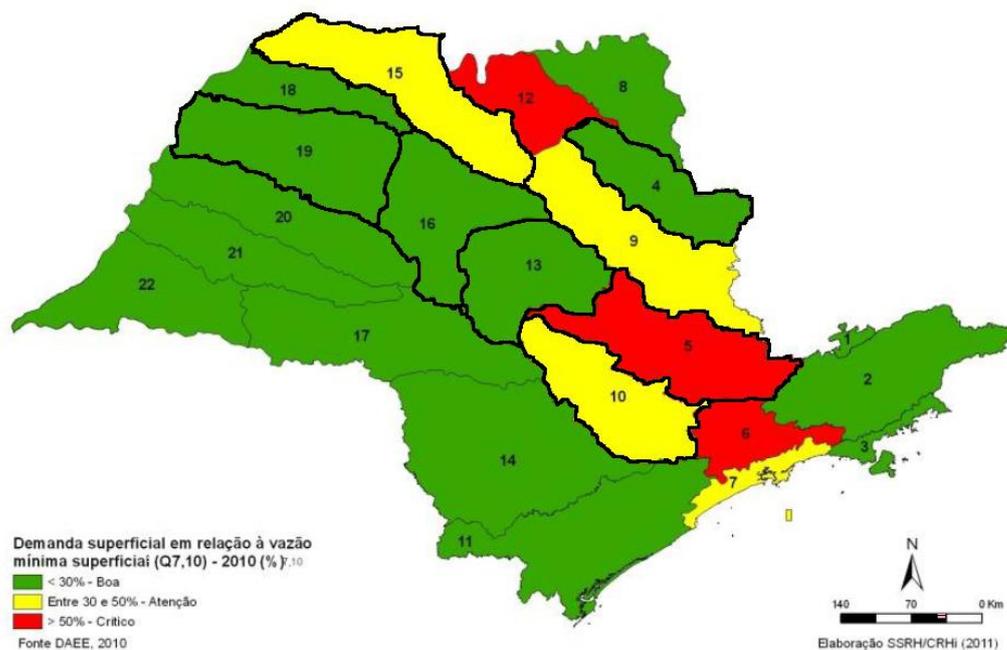


Figura 11 Demanda superficial em relação às reservas exploráveis. Fonte: CRH-SP, 2013.

4.8.5. Qualidade das águas

Em 2010, do total de 344 pontos de monitoramento de qualidade da água 206 foram classificados como de Boa, pelo Índice de Qualidade de Água (IQA)⁴.

Na UGRHI 05 são encontrados 84 pontos de monitoramento, refletindo a importância da região. Essa unidade está entre as que apresentaram piores índices de qualidade de água, juntamente a UGRHI 10. Na Região Hidrográfica da Vertente Paulista do Rio Grande, em 2010, apesar de poucos pontos de monitoramento, apresentaram bons índices de IQA.

Tabela 9 Pontos de monitoramento e IQA das UGRHIs correspondentes as usinas da AES Tietê. Fonte: Elaboração própria a partir de CRH-SP, 2013.

UGRHI	Pontos de monitoramento	Pontos classificados como				
		Ótima	Boa	Regular	Ruim	Péssima
4	4	0	4	0	0	0
5	84	1	39	27	17	0
10	24	2	10	6	6	0
13	8	0	6	2	0	0

⁴ O IQA – Índice de Qualidade das Águas que incorpora nove variáveis consideradas relevantes para a avaliação da qualidade das águas, tendo como determinante principal a sua utilização para abastecimento público (CETESB, 2013).

15	9	0	7	1	1	0
16	5	1	4	0	0	0
19	8	4	4	0	0	0

4.8.6. Estágio de implementação dos instrumentos para Gestão dos Recursos Hídricos

A Tabela 10 mostra uma caracterização da situação atual do estágio de implementação dos instrumentos para gestão dos recursos hídricos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei federal nº 9433/97).

Tabela 10 Situação da implementação dos instrumentos para gestão dos recursos hídricos. Fonte: Elaboração própria a partir de CRH-SP, 2013.

UGRHI	Plano de Recursos Hídricos	Relatório de situação	Cobrança	Enquadramento	Sistema de informação
4	Atualizado	Atualizado	Implementada	Implementada parcialmente	Não implementado, metas de implementação
5	Atualizado	Atualizado	Implementada	Proposta de atualização até 2035.	Implementado
10	Atualizado	Atualizado	Implementada	Implementada parcialmente	Não implementado, metas de implementação
13	Atualizado	Atualizado	Implementada	Implementada parcialmente	Não implementado, metas de implementação
15	Atualizado	Atualizado	Não implementada	Implementada parcialmente	Não implementado, metas de implementação
16	Atualizado	Atualizado	Implementada	Implementada parcialmente	Não implementado, metas de implementação

19	Atualizado	Atualizado	Implementada	Implementada	Não implementado, metas de implementação
----	------------	------------	--------------	--------------	--

4.8.7. Principais problemas da região

Tendo em vista os assuntos discutidos nos tópicos anteriores, nesse item serão abordados os principais problemas de cada uma das UGRHIs que englobam as usinas da AES.

Na UGRHI 05 encontra-se a cidade de Campinas e outros centros urbanos. Ela possui grandes taxas de urbanização e densidade demográfica. Tais características refletem uma alta demanda por recursos e altos níveis de poluição. Nos trechos dos rios Atibaia, Capivari, Jundiá e Piracicaba, que se encontram em regiões de alta densidade populacional, os usos são conflitantes, uma vez que a eutrofização de seus mananciais se encontra em estágio avançado. Por sua vez, a eutrofização promove o crescimento da comunidade fitoplanctônica acarretando riscos de florações de espécies potencialmente tóxicas (CRH-SP, 2006).

A UGRHI 05, assim como a 10, ambas na Região Hidrográfica do Rio Tietê, possuem oferta de água comprometida e além disso, há problemas ambientais como baixa qualidade dos recursos hídricos, susceptibilidade a inundações, erosão e assoreamento. O reservatório de Barra Bonita encontra-se em área correspondente a essas duas unidades, a jusante das áreas urbanas. Pode-se verificar que um dos principais problemas do reservatório de Barra Bonita consiste na eutrofização de suas águas (idem).

As UGRHI 13, 16 e 19, ainda na Região Hidrográfica do Rio Tietê, apresentam uma melhor disponibilidade hídrica, porém diversos problemas ambientais, carência no sistema de saneamento e no sistema de controle e monitoramento dos recursos hídricos. Apesar do reservatório de Barra Bonita desempenhar um importante papel na recuperação da qualidade das águas do rio Tietê, ainda se observam elevadas concentrações de nutrientes na água de saída deste reservatório. Os reservatórios de Ibitinga e Bariri encontra-se na UGRHI 13, Promissão no 16 e Nova Avanhadava no 19.

Na Região Hidrográfica da Vertente Paulista do Rio Grande, onde estão as UGRHIs 04 e 15 e as usinas de Caconde, Euclides da Cunha, Limoeiro e Água Vermelha,

carece de um melhor sistema de monitoramento e gestão dos dados relacionados aos recursos hídricos, uma melhora no sistema de saneamento e abastecimento de água. Na UGRHI 04 a disponibilidade hídrica ainda é considerada boa, porém a 15 sofre com problemas nesse sentido, sendo considerada uma região de atenção. Nessa última região citada encontra-se o reservatório da usina de Água Vermelha, a maior da AES Tietê em área de reservatório e produção de energia.

No geral, é possível observar que a região onde se encontram as usinas da AES é de bastante povoada, com altas demandas de uso. Associada às altas demandas, há o problema de qualidade da água, assim o problema de disponibilidade não é apenas quantitativo, mas também qualitativo.

5. Metodologia

5.1. Definição de objetivo e escopo

No presente trabalho propõe-se contabilizar o valor da pegada hídrica final para a produção de 1 Kwh de energia elétrica gerada pela AES Tiete S.A., ou seja, calcular a quantidade de água consumida para a produção de energia de fonte hidráulica gerada pela empresa.

No caso deste trabalho, a quantidade de energia gerada pode ser encarada como um produto e assim, será seguida a metodologia para cálculo da pegada hídrica de um produto proposta por HOEKSTRA *et al.* (2011).

O objetivo final é mostrar de forma geral a quantidade de água associada à produção de energia elétrica da empresa com a maior riqueza de detalhes possível dentro das possibilidades permitidas pela qualidade dos dados disponíveis.

O projeto tem como escopo de interesse a contabilização da pegada hídrica direta e indireta. A pegada hídrica direta, no caso estudado, refere-se ao volume perdido por evaporação dos reservatórios e a pegada hídrica indireta está associada ao volume relativo aos produtos que são utilizados pela empresa para a produção de energia.

O escopo do projeto engloba o cálculo das pegadas azul, verde e cinza. A pegada hídrica direta está associada somente à pegada azul, assim os valores de pegadas verde e cinza são exclusivamente advindos da pegada indireta.

Esse estudo de caso está focado na fase de contabilização da pegada hídrica, se referindo assim à fase dois das etapas propostas por HOEKSTRA *et al.* (2011) e apresentadas na página 10 desse trabalho. O estudo de caso busca fornecer a informação sobre a quantidade de água consumida associada ao produto da empresa

AES Tietê S.A., tendo como foco do projeto o melhor entendimento de suas próprias atividades e dos bens naturais que para isso são utilizados.

As fronteiras do projeto, relacionadas à pegada hídrica dos produtos consumidos, no caso a pegada indireta, foram definidas com base nos principais protocolos de Pegada de Carbono, que definem que não devem entrar no cálculo da pegada materiais definidos como infraestrutura como transformadores, chaves, postes, edifícios, etc. À exceção disso, entraram no cálculo os cabos elétricos, que pela necessidade de constante troca podem não ser considerados como bens de infraestrutura, mas de consumo. Também não foram incluídos os gastos energéticos das atividades administrativas da empresa como consumo dos prédios administrativos, bem como de energia elétrica dos prédios, etc.

A análise do ciclo de vida dos produtos foi feita até a matéria prima de base, sendo excluídas matérias primas que representassem participação inferior a 1% das matérias primas dos produtos.

O nível de resolução temporal foi escolhido de forma diferenciada para a pegada direta e indireta devido a disponibilidade de dados. Para a pegada hídrica indireta foi usado o nível A para os produtos produzidos no exterior e nível B para os produtos produzidos no Brasil. Para a pegada direta foi usado o nível C, utilizando dados de evaporação específicos para os reservatórios em questão com resolução temporal mensal.

A pegada hídrica calculada para a AES Tietê S.A. tem como período de dados um ano. Assim são contabilizados no cálculo da pegada a evaporação dos reservatórios, os produtos consumidos e a quantidade de energia produzida, todos em igual período.

5.2. Cálculo da pegada hídrica

O projeto de pegada hídrica desenvolvido pela FBDS fez parte do projeto de pegada ecológica da AES, onde são englobadas as pegadas de água e de carbono. O projeto teve como objetivo o desenvolvimento da metodologia de cálculo das pegadas baseados nos manuais existentes na bibliografia e no desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo que proporcione a autonomia da empresa na definição de sua pegada a cada ano. Tendo como dado de entrada as quantidades de cada produto utilizadas no ano, as distâncias e pesos correspondentes aos transportes desses produtos, a geração total de energia elétrica e os volumes dos reservatórios a AES Tietê possui como saída o volume de água e as toneladas de carbono equivalentes emitidas por unidade de energia produzida.

O cálculo da pegada hídrica da AES Tiete, tem como unidade funcional 1 Kwh, sendo a pegada hídrica reportada em m³/kWh.

O método usado para o cálculo da pegada hídrica foi o contido em HOEKSTRA *et al.* (2011), descrito na revisão bibliográfica do presente trabalho. A pegada final foi calculada em duas etapas. Na primeira foram levados em consideração os principais produtos utilizados pela empresa, seus processos produtivos e transporte; a segunda corresponde à evaporação dos reservatórios.

5.2.1. Cálculo da pegada relacionadas aos produtos

Esta parcela do cálculo diz respeito à pegada hídrica dos produtos consumidos pela empresa durante o ano em questão necessários à produção de energia.

O primeiro passo para o cálculo da pegada hídrica de um produto é a identificação de seu sistema de produção. Um sistema de produção consiste em etapas de processos sequenciais (HOEKSTRA *et al.*, 2011) que devem ser identificadas e arranjadas de modo que a pegada do produto final possa ser calculada de forma propagada, levando em conta todas as etapas do processo relevantes dentro do escopo do projeto.

Considerando que muitos produtos necessitam de diversos insumos acontece de múltiplas etapas de processos precederem a etapa seguinte. O refino do petróleo, por exemplo, é um processo que precede a fabricação de diversos produtos que possuem esse recurso como matéria prima. Neste caso não teremos uma cadeia linear de etapas do processo, mas sim uma “árvore de produção” (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

De acordo com HOEKSTRA *et al.* (2011), para estimar a pegada hídrica de um produto é preciso esquematizar o sistema de produção em um número limitado de etapas interligadas do processo, definindo as fronteiras do projeto.

O processo da elaboração do banco de dados de análise de ciclo de vida dos produtos utilizados pela AES Tietê S.A. foi realizado pela FBDS, sendo uma etapa anterior à realização do presente trabalho. A metodologia de elaboração desse banco de dados será descrito no ANEXO I.

Esta etapa refere-se à construção de mapas de processos de todos os produtos considerados significantes no uso da AES Tietê S.A., onde nesses mapas constam informações de consumo de água direto, seja ela incorporada ao produto ou evaporada, quantidade de cada matéria prima utilizada, energia gasta para sua produção, transportes necessários e poluição gerada. Essas informações foram organizadas para cada produto percorrendo todo sua cadeia de produção até a matéria prima mais básica.

Os itens a seguir descrevem o cálculo da pegada hídrica das unidades individuais de cada um desses produtos, tendo como base os mapas de processos com todas as informações necessárias. No fim dessa etapa, para calcular a pegada total relativa aos produtos da empresa, será necessário multiplicar as pegadas de cada produto (dadas em m³/unidade de produto) pela sua quantidade utilizada no ano (definindo o volume de água consumido em m³) e dividi-la pela quantidade de energia gerada (produzindo a informação de pegada em m³/kWh).

5.2.1.1. Pegada Hídrica Azul

O cálculo da pegada hídrica azul foi feito com os dados de entrada de água consumidos em cada processo. Essa água usada no processo produtivo pode ser incorporada ao produto, evaporada para uso de resfriamento, ou algum outro uso no processo produtivo considerado consuntivo. Além da água diretamente usada no processo produtivo, também contribuem para a pegada azul final do processo parcelas das pegadas relativas a energia usada e aos transportes. Tais cálculos serão melhor explicados na seção 5.2.1.4.

A informação de quantidade utilizada de água azul é dada em metros cúbicos, sendo o dado de saída da pegada do produto dada em metros cúbicos de água por quilograma de produto.

Esses valores foram propagados considerando todo o processo produtivo de cada produto utilizado pela AES, de acordo com os limites definidos pelo projeto.

5.2.1.2. Pegada Hídrica Verde

A água verde associada à pegada final é advinda dos biocombustíveis presentes no processo produtivo, que fazem uso desse tipo de água de forma extensiva.

Os dados de pegada hídrica verde são relacionados aos transportes de cada produto e seu respectivo uso de biocombustíveis, sendo melhor explicada na seção 5.2.1.4.2. Os dados de uso de água verde foram retirados do estudo MEKONNEN E HOEKSTRA (2010). O estudo referenciado apresenta uma pesquisa bastante extensa que inclui valores de pegada para etanol e biodiesel para uma centena de países pelo mundo, dividindo em pegada por estado. Nele constam os valores das pegadas hídricas para o etanol de cana e o biodiesel de soja brasileiro para cada estado. O valor utilizado neste trabalho foi a média nacional.

5.2.1.3. Pegada Hídrica Cinza

Para o cálculo desta pegada foi aplicada a metodologia contida em HOEKSTRA *et al.* (2011), onde:

$$PH_{proc, cinza} = L / (c_{max} - c_{nat})$$

Sendo,

L = carga do poluente (L , em massa/tempo)

c_{max} = concentração do padrão ambiental de qualidade da água para um determinado poluente (a concentração máxima aceitável c_{max} , em massa/volume)

c_{nat} = concentração natural no corpo d'água receptor (c_{nat} , em massa/volume)

Para aplicação desta fórmula foram usados os dados de geração de poluição de cada processo. O parâmetro usado para o cálculo da pegada foi a DBO produzida em cada processo produtivo, onde os dados estão em kg de DBO por unidade de produto.

Os valores de c_{max} e c_{nat} são valores que dependem do curso d'água onde o efluente está sendo despejado, porém, como a produção dos itens analisados é difusa, optou-se por utilizar valores fixos desses fatores.

Segundo KLEIN (1962) *apud* VON SPERLING (2005), um rio muito limpo possui DBO igual a 1mg/l, sendo também esse o valor adotado pela ANA para c_{nat} para o cálculo da vazão de diluição. Desta forma, para o cálculo da pegada cinza, o valor de c_{nat} adotado foi igualmente de 1mg/l.

Pra o valor de c_{max} foi adotado 5mg/l, que corresponde ao de um rio classificado como classe 2 segundo a CONAMA 357. Essa classe foi escolhida, pois os rios sem estudo de enquadramento são automaticamente classificados como classe 2, o que corresponde à maior parte da realidade nacional. Os valores de c_{max} e c_{nat} foram mantidos para a produção nacional e para os produtos importados.

Assim como na pegada azul e verde, os valores foram propagados considerando todo o processo produtivo de cada produto utilizado pela AES, de acordo com os limites definidos pelo projeto, gerando um resultado de m³ de água cinza por unidade de produto.

5.2.1.4. Pegadas agregadas

Além dos volumes de água diretamente usados em cada processo produtivo dos produtos ao longo de sua cadeia, também foram agregados ao cálculo da pegada hídrica os volumes de água associados à energia elétrica utilizada e ao transporte.

A consideração desses fatores se dá devido à alta participação de energia hidrelétrica e biomassa na matriz energética nacional. Esses tipos de fontes consomem uma quantidade significativa de água, sendo assim, recomendado por HOEKSTRA *et al.* (2011) a inclusão no cálculo da pegada.

5.2.1.4.1. Energia elétrica

A principal fonte energética do sistema elétrico brasileiro é a hidráulica, e como dito anteriormente, trata-se de uma fonte com um elevado consumo de água. Por esse motivo, optou-se por incluir na pegada hídrica dos produtos utilizados pela AES a parcela relativa à utilização de energia elétrica.

Apesar de na matriz média mundial a fração de energia proveniente da hidroeletricidade não ser tão representativa quanto na matriz brasileira, a pegada relativa à eletricidade também foi considerada no cálculo para produtos produzidos no exterior para manter o padrão metodológico.

Como visto na seção 4.3 e 4.5, a eletricidade tanto no Brasil como no mundo provém de uma distribuição por tipo de fonte. O cálculo da pegada hídrica relativo à produção de eletricidade foi calculado levando em conta todas as suas fontes e suas respectivas pegadas hídricas, usando para o cálculo os valores de pegadas presentes em GERBENS-LEENES *et al.* (2008), mostrados nas seções 4.3 e 4.5.

Tais valores, multiplicados pelo percentual de participação na geração total e somados, constituem o cálculo da pegada hídrica relativa ao consumo de energia elétrica.

A partir de uma média ponderada de acordo com o percentual de participação de cada fonte, foi obtido um valor de pegada hídrica por unidade de energia elétrica consumida (m³ de água por MJ). Esta ponderação foi feita com a média dos dados do BEN (Balanço Energético Nacional) dos anos de 2008, 2009 e 2010 para a eletricidade brasileira.

Para a pegada associada ao consumo de energia elétrica internacional, o mesmo método foi usado, utilizando os mesmos fatores de pegada hídrica para cada fonte, exceto biomassa, onde o fator empregado foi o da média dos fatores dos países apresentados no artigo (Holanda, Estados Unidos, Brasil e Zimbábue), GLEICK (1993) e SHIKLOMANOV (2000) *apud* GERBENS-LEENES *et al.* (2008). A ponderação do percentual de cada fonte de energia elétrica foi feita utilizando dados para média mundial da IEA para 2008, 2009 e 2010 de produção de eletricidade, dados apresentados no item 4.3 do presente trabalho.

A fonte utilizada não faz a distinção entre as pegadas azul, verde e cinza. A pegada hídrica relacionada à eletricidade de todas as fontes foi enquadrada como pegada azul, excetuando a fração advinda de biomassa, onde a pegada é praticamente proveniente de água verde.

A Tabela 11 e a Tabela 12 mostram os dados utilizados para o cálculo das pegadas de produção de energia elétrica no Brasil e no mundo respectivamente.

Tabela 11 Dados para cálculo da pegada hídrica da energia elétrica produzida no Brasil.

Produção de energia elétrica Brasil		Pegada hídrica (m³/GJ)	Pegada parcial (m³/GJ)	Fonte pegada hídrica
Fonte	Porcentagem média 2008 - 2010 (EPE)			
Hidráulica	82,50%	22	0,181	a
Gás natural	5,30%	0,1	0,000	b
Biomassa	4,40%	61	0,027	a
Derivados de petróleo	3,30%	1,1	0,000	b
Nuclear	2,80%	0,1	0,000	b
Carvão e derivados	1,50%	0,2	0,000	b
Eólica	0,30%	0	0,000	b

a - Gleick (1993) and Shiklomanov (2000) *apud* Gerbens-Leenes *et al* (2008)

b - Gleick (1994) *apud* Gerbens-Leenes *et al* (2009)

Tabela 12 Dados para cálculo da pegada hídrica da energia elétrica produzida no mundo.

Produção de energia elétrica Mundial		Pegada hídrica (m³/GJ)	Pegada parcial (m³/GJ)	Fonte pegada hídrica
Fonte	Porcentagem média 2008 - 2010 (IEA)			
Hidráulica	16%	22	0,0353	a
Gás natural	22%	0,1	0,0002	b
Biomassa	2%	61	0,0098	a
Derivados de petróleo	5%	1,1	0,0006	b
Nuclear	13%	0,1	0,0001	b
Carvão e derivados	41%	0,2	0,0008	b
Eólica	2%	0	0	b

a - Gerbens-Leenes *et al* (2009) *apud* Gleick (1993)

b - Gerbens-Leenes *et al* (2009) *apud* Gleick (1994)

5.2.1.4.2. Transporte

Primeiramente, para cálculo da pegada associada ao transporte foram calculadas as pegadas do diesel e da gasolina, considerados produtos primários. Essas pegadas foram estimadas considerando o mapa de processo, identificando as matérias primas utilizadas em seu processo produtivo. Para cada produto utilizado pela empresa, foram agregados à sua pegada hídrica os valores de consumo de água relativos à produção dos combustíveis consumidos em seus transportes, acumulados em toda cadeia produtiva.

No processo produtivo de um produto, seu transporte para comercialização, ou o transporte de matérias primas podem ser fatores importantes no que dizem respeito ao consumo de água.

As informações de quantidades de combustíveis consumidos são disponibilizadas nos mapas de processo de cada produto e através delas foram calculadas as pegadas multiplicando o consumo, em kg de combustível, pelas pegadas primeiramente calculadas de cada combustível, em m³ de água por kg de combustível.

Para os produtos produzidos no exterior foram considerados apenas o consumo de gasolina e diesel pelos transportes. No entanto, no Brasil, a lei 10.203/01 define que obrigatoriamente a quantidade de álcool anidro na gasolina deve ser de 20% a 24%, assim como a quantidade de biodiesel no diesel é regulada pela lei 11.097/05 em 5% de seu volume.

Para o cálculo da pegada associada ao uso de biocombustíveis foram usados diretamente os fatores presentes em MEKONNEN E HOEKSTRA (2010) que apresenta a pegada hídrica do biodiesel de soja e do etanol de cana de açúcar para o Brasil.

As pegadas do estudo são reportadas em m³/ GJ de energia dos combustíveis. Como o dado de entrada dos combustíveis é feito em kg no mapa de processo, os fatores do estudo foram transformados em metro cúbico de água consumida por kg de combustível (m³/kg). Os valores das pegadas utilizadas são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 Fatores de pegada hídrica para os biocombustíveis.

Combustível	Pegada azul (m ³ /GJ) ^a	Pegada verde (m ³ /GJ) ^a	Pegada cinza (m ³ /GJ) ^a	MJ/kg ^b
Etanol	2	349	2	37,71
Biodiesel	0	52	4	27,5

Fonte: a- MEKONNEN e HOEKSTRA (2010)

b- EPE, 2013b

5.2.1.5. Método de cálculo usado para a pegada hídrica do produto

Tendo o estudo de análise de ciclo de vida dos constituintes dos produtos a considerados e os fatores de consumo de água relacionados à eletricidade e aos transportes, é possível o cálculo da pegada hídrica de cada produto gerando um resultado de uso da água em m³/kg de produto.

Como pode ser visto nos exemplos de mapas de processo, um produto pode possuir uma árvore de processos para representar sua cadeia produtiva. Da mesma forma que a confecção de um produto está associado a vários processos, um processo pode estar associado a confecção de vários produtos.

A Figura 12 mostra esquematicamente o caso descrito acima, onde um produto “p” é elaborado a partir de “y” insumos. Os insumos são numerados de i=1 a y. O processamento dos “y” insumos resulta em “z” produtos finais. Podemos enumerar os produtos finais de p=1 a z.

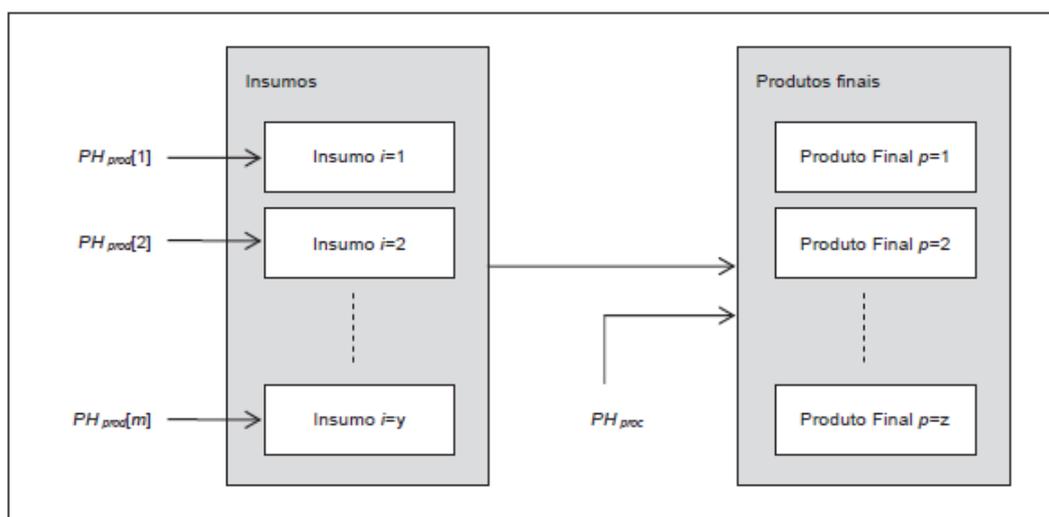


Figura 12 Esquematização do último passo do processo no sistema de produção do produto “p”. Fonte: HOEKSTRA et al. (2011).

A pegada hídrica do produto final ‘p’ é calculada com base nas pegadas hídricas dos insumos e na pegada hídrica do processo quando os insumos geram os produtos finais. Se há algum uso de água envolvido durante o processamento, a pegada hídrica do processo é adicionada às pegadas hídricas dos insumos antes que o total seja distribuído pelos diversos produtos finais (HOEKSTRA *et al.*, 2011). A pegada hídrica do produto resultante “p” foi calculada da seguinte forma:

$$PH_{prod} = PH_{proc}[p] + \sum_{i=1}^y \frac{PH_{prod}[i]}{fp[p, i]}$$

Onde $PH_{prod}[p]$ é a pegada hídrica (volume/massa) do produto final “p”, $PH_{prod}[i]$ é a pegada hídrica do insumo “i” e $PH_{proc}[p]$ é a pegada hídrica do processamento que transforma os “y” insumos em “z” produtos de saída expressos com base no uso da água por unidade de produto processado “p” (volume/massa) (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

A fração de um produto final “p” que é processado a partir de um insumo “i” ($fp[p, i]$, massa/massa) é definida como a quantidade de produto final ($peso[p]$, massa), obtida de acordo com a quantidade de insumo ($peso[i]$, massa):

$$fp[p, i] = \frac{peso [p]}{peso [i]}$$

A *Figura 13* mostra, para o exemplo da gasolina como produto final, o cálculo de sua pegada hídrica

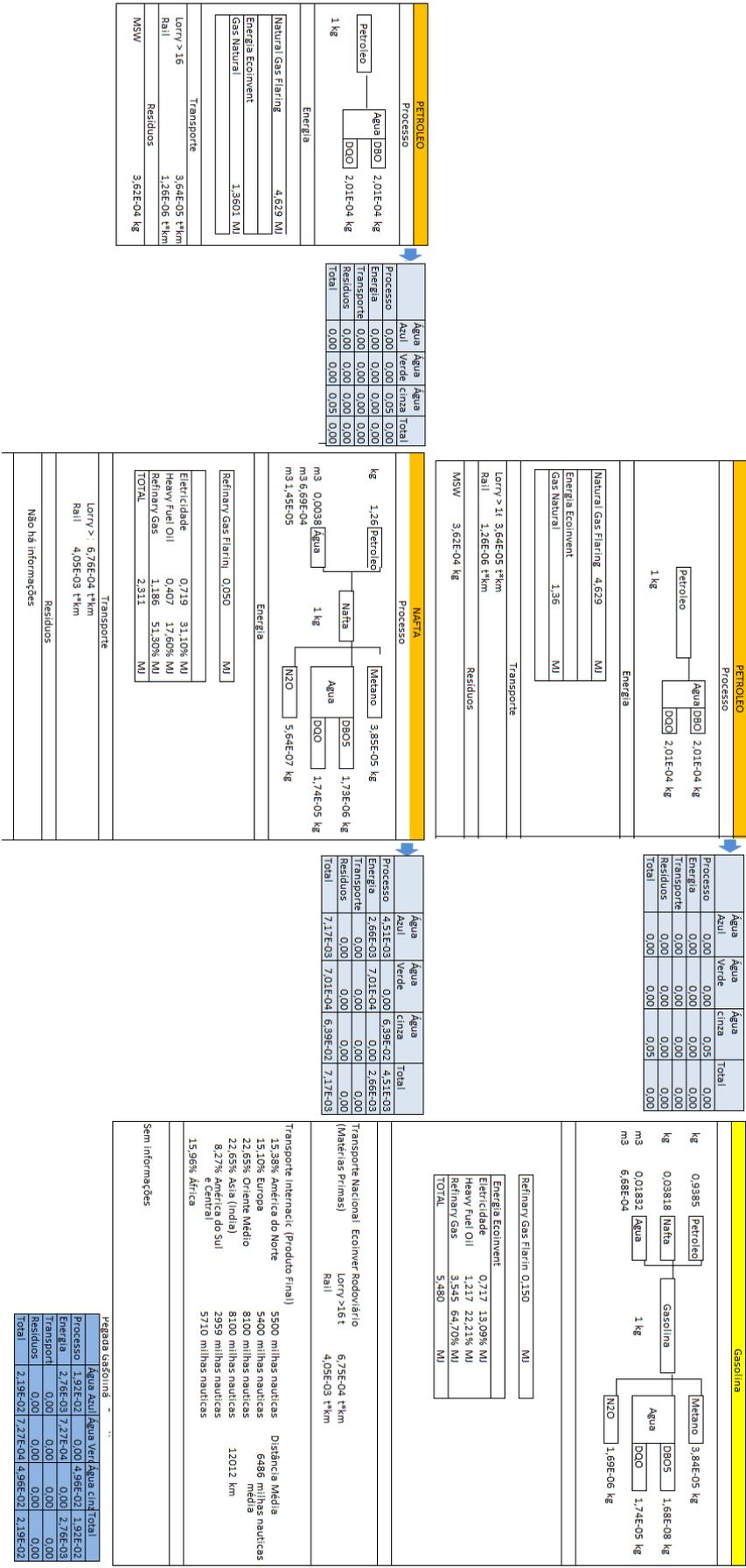


Figura 13 Cálculo da pegada para gasolina internacional.

A Figura 14 mostra o detalhe da Figura 13 pegada do nafta, parcela da pegada da gasolina.

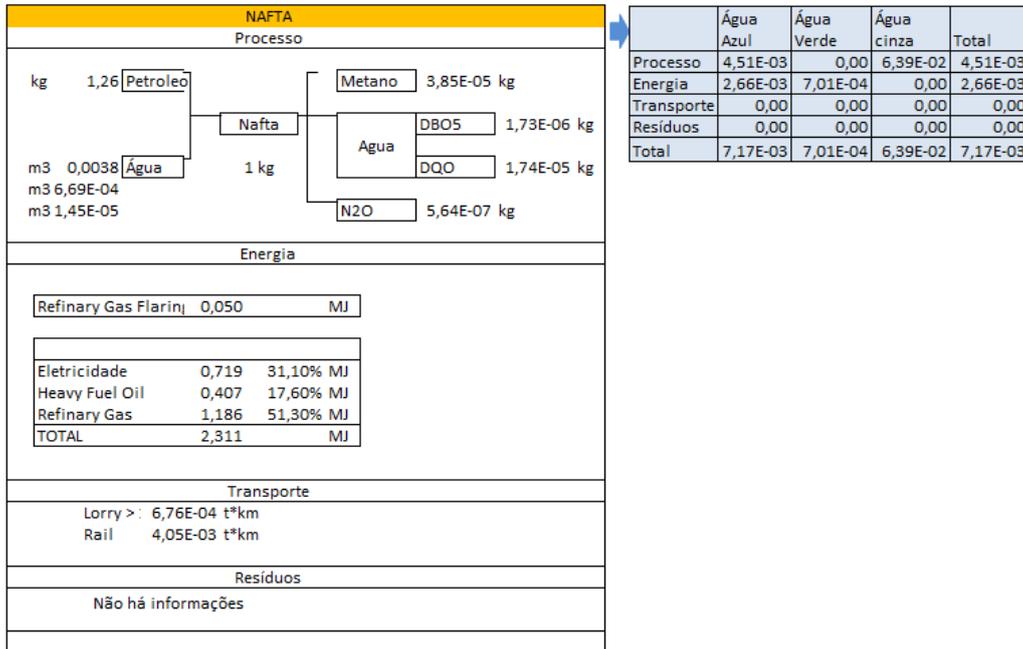


Figura 14 Detalhe da figura 10, pegada do nafta.

A Figura 15 mostra o resultado final da pegada hídrica da gasolina considerando a produção nacional e a importação.

Gasolina Produzido no Exterior			
Pegada Hídrica (m³/kg)			
Matriz Gasolina	Água azul	Água verde	Água cinza
Processo	1,92E-02	0,00E+00	4,96E-02
Energia	2,76E-03	7,27E-04	0,00E+00
Transporte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Residuos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Gasolina Produzido no Brasil			
Pegada Hídrica (m³/kg)			
Matriz Gasolina	Água azul	Água verde	Água cinza
Processo	1,92E-02	0,00E+00	2,07E-05
Energia	6,87E-03	1,01E-03	0,00E+00
Transporte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Residuos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Média do Consumo Brasileiro: (98,00% produzido no país e 2,00% no exterior)

Pegada Hídrica (m³/kg)			
Matriz Gasolina	Água azul	Água verde	Água cinza
Processo	1,92E-02	0,00E+00	1,01E-03
Energia	6,79E-03	1,00E-03	0,00E+00
Transporte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Residuos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total	2,5955E-02	1,0044E-03	1,0126E-03

Total (m³/kg)	2,7972E-02
Total (m³/MJ)	6,4245E-04

Figura 15 Resultado pegada hídrica para gasolina considerando consumo de produção nacional e importação.

5.2.2. Cálculo da pegada relacionada à evaporação dos Reservatórios

Esta corresponde à segunda parte da pegada hídrica total calculada para o produto final, a energia gerada pela AES Tietê. Nesse ponto, optou-se pelo cálculo da pegada para um ano médio. Para essa parte do estudo foram buscados dados de evaporação dos reservatórios da empresa associados a suas usinas.

Foram consideradas no cálculo as nove usinas hidrelétricas da AES Tietê, sendo desconsiderada a evaporação das PCHs, uma vez que não há dados disponíveis de evaporação e, por representarem juntas uma parcela muito pequena do total de geração da AES, cerca de 0,5%. Desta forma, optou-se por não estimá-las.

Os dados de evaporação para esse cálculo foram retiradas de ONS (2004), onde a estimativa das evaporações líquidas foi feita através da determinação da evapotranspiração real e potencial usando o modelo CRAE - Complementary Relationship Areal Evapotranspiration, e a evaporação de lago e potencial usando o modelo CRLE - Complementary Relationship Lake Evaporation. A evaporação líquida necessária para correção das séries de vazões dos aproveitamentos hidrelétricos para uso nas simulações energéticas é obtida pela diferença entre a evaporação de lago e a evapotranspiração real calculada (ONS, 2004). Para aplicar tais modelos os dados de entrada foram as grandezas de temperatura, de umidade relativa, de insolação e de precipitação nos locais dos aproveitamentos hidrelétricos. O resultado desse estudo foram valores médios mensais de evaporação líquida para cada reservatório, em milímetros.

A evaporação líquida de um reservatório representa o volume que pode ser atribuído ao consumo da atividade humana. Por ser o volume de água que realmente evapora descontado do volume que naturalmente evaporaria caso a atividade humana não existisse naquele local. Desta forma, optou-se por utilizar este valor para o cálculo da fração da pegada hídrica relativa à evaporação dos reservatórios.

Os dados de evaporação líquida para os reservatórios da AES presentes em ONS (2004) são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 Evaporação líquida reservatórios AES (mm) Fonte: ONS, 2004.

Usina	Evaporação (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Água vermelha	12	16	30	53	73	74	65	61	58	23	3	27

Promissão	16	18	37	62	77	72	59	55	53	22	4	30
Ibitinga	19	16	37	63	75	69	55	50	49	23	3	31
Bariri	21	16	38	64	74	67	53	47	46	21	2	30
Nova Avanhandava	16	20	37	60	77	73	60	56	53	21	4	28
Barra bonita	23	17	38	64	73	64	50	43	42	19	1	30
Euclides da cunha	22	11	25	42	58	52	47	43	41	15	7	24
Caconde	18	11	35	49	60	60	54	55	47	17	19	30
Limoeiro	22	11	24	45	60	54	46	42	42	21	4	24

5.2.2.1. Cálculo da área dos reservatórios

Para o cálculo da pegada hídrica é necessário o dado de volume de água evaporada. Uma vez que os dados de evaporação estão em mm, é necessário conhecer as áreas dos reservatórios.

Para achar a área de cada reservatório, foram extraídos dados de percentual do volume útil dos principais reservatórios fornecidos pelo ONS, disponíveis na sua página na internet. Os dados disponibilizados pelo ONS representam o percentual do volume útil disponível para cada mês para os principais reservatórios do SIN.

Como o objetivo é calcular a pegada para um ano médio, foram extraídos os dados de percentual de volume útil de uma série histórica de 10 anos (2002-2012) para os reservatórios da AES disponíveis, sendo eles: Água Vermelha, Barra Bonita e Promissão.

Para os reservatórios em questão, foi feita uma média mensal do percentual do volume útil representativa da série histórica. Para os demais reservatórios, cujos dados não estão disponíveis, o percentual de volume útil considerado foi a média entre os três reservatórios anteriormente citados.

Alguns parâmetros básicos dos reservatórios foram extraídos do “Inventário de Dados Técnicos de Aproveitamentos Hidroelétricos” feito pelo ONS, disponível na sua página da internet. Tais parâmetros foram:

- Volume máximo normal
- Volume mínimo normal
- Polinômio área-cota
- Polinômio cota-volume

A área dos reservatórios é calculada através dos polinômios. O dado de entrada do polinômio cota volume é o volume real presente no reservatório.

Para calcular uma média dos volumes reais dos reservatórios, primeiramente calculou-se o volume útil para cada um deles através da subtração do volume máximo pelo volume mínimo.

O volume útil de cada reservatório foi multiplicado pela média mensal do percentual de volume útil, gerando assim os dados de média mensal de volume útil presente em cada reservatório relativas à série histórica de 2002 a 2012. Esses valores de volume útil foram somados aos volumes mínimos e assim foram obtidos os valores de volume reais médios para cada mês de cada reservatório.

Com as médias dos volumes reais mensais dos reservatórios e com os polinômios representativos de cota-volume foram calculadas cotas relativas a cada dado de volume para cada reservatório. Com esses dados de cotas calculados, foram obtidas com os polinômios de cota-área, as áreas mensais médias para cada reservatório correspondentes à série histórica de 2002 a 2012.

Tabela 15 Parâmetros dos polinômios COTA – VOLUME. Fonte: (ONS, s.d.)

Reservatório	aPCV	bPCV	cPCV	dPCV	ePCV
Água Vermelha	3,52E+02	5,00E-03	-2,74E-07	7,10E-12	0,00
Bariri	4,28E+02	0,00	0,00	0,00	0,00
Barra Bonita	4,33E+02	1,50E-02	-6,71E-06	1,76E-09	-1,70E-13
Caconde	8,16E+02	1,98E-01	-5,74E-04	9,69E-07	-6,33E-10
Euclides da Cunha	6,65E+02	0,00	0,00	0,00	0,00
Ibitinga	4,04E+02	0,00	0,00	0,00	0,00
Limoeiro	5,73E+02	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Avanhandava	3,58E+02	0,00	0,00	0,00	0,00
Promissão	3,70E+02	-5,25E-04	1,08E-06	-1,60E-10	7,93E-15

Tabela 16 Parâmetros do polinômio COTA – ÁREA. Fonte: (ONS, s.d.)

Reservatório	aPCA	bPCA	cPCA	dPCA	ePCA
Água Vermelha	5,54E+04	-3,15E+02	4,48E-01	0,00	0,00
Bariri	6,25E+01	0,00	0,00	0,00	0,00
Barra Bonita	-5,45E+05	3,21E+03	-5,11E+00	-9,73E-04	5,48E-06
Caconde	1,52E+05	-3,92E+02	1,12E-01	3,68E-04	-2,42E-07
Euclides da Cunha	1,07E+00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ibitinga	1,15E+02	0,00	0,00	0,00	0,00
Limoeiro	2,70E+00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Avanhandava	2,12E+02	0,00	0,00	0,00	0,00
Promissão	-3,39E+04	1,64E+02	-1,93E-01	0,00	0,00

5.2.2.2. Cálculo da evaporação

O cálculo da evaporação de cada reservatório foi realizado a partir da multiplicação da área média mensal calculada na etapa anterior pela evaporação líquida mensal em mm fornecida pelo ONS.

Desta forma, têm-se os dados de média de evaporação líquida em cada reservatório para cada mês do ano e uma evaporação anual média (Tabela 17).

Tabela 17 Volume de evaporação líquida anual média.

Usina	Evaporação anual média (10⁶ m³)
Água Vermelha	279,3
Promissão	258,6
Ibitinga	56,3
Bariri	30,0
Nova Avanhadava	107,1
Barra Bonita	129,4
Euclides da Cunha	0,4
Caconde	14,0
Limoeiro	1,1

5.2.3. Cálculo da pegada relativa à evaporação dos reservatórios

A pegada hídrica de energia elétrica é representada pela quantidade de água consumida por kWh gerado. No caso da fração relativa à evaporação dos reservatórios, representa o volume de água evaporada atribuída à atividade da usina para cada kWh produzido.

A AES forneceu em seu Cadastro Técnico AES as gerações médias anuais de cada uma de suas usinas. Uma vez que os dados de evaporação estão também divididos por usina, foi possível calcular as pegadas individuais, somando as evaporações mensais de cada usina e dividindo pela respectiva produção de energia.

Tendo o resultado parcial das pegadas por usina, as evaporações de todas as unidades foram somadas e divididas pela produção de energia elétrica total, tendo desta forma, a pegada total da empresa relativa à evaporação dos reservatórios para um ano médio, reportada em m^3/Kwh .

6. Resultados

Até o momento da finalização deste estudo os dados finais de quantidades e composição dos produtos mais utilizados pela AES, assim como os dados de geração de cada usina, não haviam sido enviados à FBDS para a finalização do projeto.

No entanto, uma análise prévia dos dados, nos faz acreditar que a parcela da pegada hídrica relativa aos produtos seria significativamente inferior à pegada relativa à evaporação dos reservatórios. Em estudo sobre a pegada hídrica de hidroeletricidade em diversas usinas pelo mundo MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a) não contabiliza o que chama de *supply-chain water footprint*, que seria exatamente a pegada relativa aos produtos usados para a geração de energia, que segundo INHABER (2004); FTHENAKIS e KIM (2010) *apud* MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a), é esperado que seja bastante inferior à pegada hídrica operacional, ou seja, à pegada relativa à evaporação dos reservatórios.

Embora resultados finais relativos ao consumo de produtos não tenham gerados produzidos, serão apresentados a seguir resultados dos cálculos precedentes, etapas anteriores à pegada final, necessários à sua obtenção.

Foi necessário para o cálculo da pegada relativa aos produtos, além de considerar o consumo direto em cada processo da cadeia produtiva de cada produto, calcular as pegadas relativas ao consumo de energia elétrica e aos transportes.

Os valores foram calculados para os casos de produção nacional e de importação, sendo os resultados apresentados na Tabela 18, distinguindo as pegadas azul, verde e cinza.

Tabela 18 Pegadas associadas ao consumo de eletricidade e combustíveis

Eletricidade	Pegada		
	Azul	Verde	Cinza
Eletricidade mundo (m ³ /MJ)	0,0037	0,001	-
Eletricidade Brasil (m ³ /MJ)	0,0182	0,0027	-
Combustível	Pegada		
	Azul	Verde	Cinza
Diesel (m ³ /kg)	0,006	0,0003	0,0516
Biodiesel (m ³ /kg)*	-	13,1608	0,0754
Diesel B5 (m ³ /kg)	0,0081	0,6586	0,0117
Gasolina (m ³ /kg)	0,0026	0,0018	0,001
Etanol (m ³ /kg)*	0,055	1,43	0,11
Gasolina brasileira (m ³ /kg)	0,0131	0,2875	0,0228

*Valores extraídos de MEKONNEN e HOEKSTRA (2010)

O valor final da pegada relativa aos produtos dependerá do consumo anual dos mesmos pela empresa e apesar de não ter sido produzido, a base para seu cálculo encontra-se pronta e descrita na metodologia deste trabalho.

Na Tabela 19 são apresentadas as pegadas hídricas das distintas usinas da AES Tietê S.A. Os dados são apresentados em m³/KWh, litros/kWh e m³/GJ. A Tabela 20 apresenta o resultado final da pegada hídrica da empresa AES Tietê S.A. O resultado é igualmente apresentado em m³/KWh, litros/kWh e m³/GJ para facilitar a comparação entre diferentes resultados que serão feitos nas discussões.

Tabela 19 Pegada Hídrica por Usina para um ano médio

Usina	Pegada hídrica por usina (m ³ /kWh)	Pegada hídrica por usina (litros/kWh)
Água Vermelha	0,034	33,80
Promissão	0,246	246,31
Ibitinga	0,078	78,47
Bariri	0,047	47,26
Nova Avanhadava	0,171	171,30
Barra Bonita	0,215	215,32
Euclides da Cunha	0,001	0,85
Caconde	0,035	34,52

Limoeiro	0,009	8,67
-----------------	-------	------

Tabela 20 Pegada Hídrica total AES para um ano médio

Pegada Hídrica final	0,068	m ³ /KWh
	67,881	litros/kWh
	18,856	m ³ /GJ

7. Discussão

O resultado final da pegada hídrica da eletricidade da AES poderá ser discutido apenas parcialmente, pois embora a definição do projeto busque a pegada hídrica através do cálculo em duas etapas, na pegada relativa aos produtos utilizados e na pegada relativa à evaporação dos reservatórios, os valores correspondentes à primeira etapa não foram produzidos por falta de dados.

Acredita-se que a pegada hídrica relativa aos produtos seja pouco relevante perante a pegada relativa à parcela integral da evaporação dos reservatórios. Desta forma, é possível fazer a discussão dos resultados levando em conta somente a segunda parcela da pegada hídrica, a evaporação dos reservatórios, sem prejudicar a qualidade do trabalho.

7.1. Pegadas parciais relativas aos produtos

Embora a análise do resultado final da pegada dos produtos não possa ser feita, algumas observações podem ser realizadas quanto aos resultados parciais.

É possível observar, como esperado, uma significativa diferença entre as pegadas relativas ao consumo de energia elétrica produzida no Brasil e a energia considerada média mundial. Essa diferença se dá pela distribuição das fontes de energia, sendo o Brasil intensivo em hidroeletricidade e utilizando significativamente a biomassa. Ambas as fontes de energia possuem um grande consumo associada, como já discutido anteriormente.

Da mesma forma, os combustíveis brasileiros, pelo seu teor de biocombustível, também possuem pegadas hídricas mais elevadas, uma vez que as culturas possuem um grande consumo de água agregados ao seu crescimento, principalmente consumo de água verde.

Uma comparação entre as pegadas hídricas das fontes primárias de energia que podem ser aplicadas ao Brasil mostra que a hidroeletricidade realmente corresponde a

uma das fontes com maior consumo de água. Sua pegada hídrica é apenas comparável à biomassa, que possui pegada hídrica ainda mais elevada. A pegada hídrica da biomassa é praticamente total de pegada verde, por outro lado, a pegada da hidroeletricidade é exclusivamente azul, se considerada apenas a evaporação em seu cálculo. Assim, embora a biomassa possua uma pegada mais elevada, a hidroeletricidade consome uma água mais nobre, tendo maior impacto sobre os conflitos pelo uso da água.

Tabela 21 Pegada Hídrica de fontes de energia primárias (m³/GJ)

Fonte de Energia Primária	Pegada Hídrica Média (m³/GJ)
Energia eólica ^a	0
Energia nuclear ^a	0,1
Gás Natural ^a	0,1
Carvão ^a	0,2
Energia Térmica Solar ^a	0,3
Petróleo ^a	1,1
Hidroeletricidade AES Tietê	18,9
Biomassa Brasil ^b	61

Fontes:^a GLEICK, 1994 apud GERBENS-LEENES et al., 2008

^b GERBENS-LEENES et al. 2008

7.2. Pegadas de evaporação

As pegadas das diferentes usinas da AES apresentam valores bastante distintos entre si, embora geograficamente todas estejam localizadas na mesma região. Uma análise no Google Earth mostra que as áreas no entorno dos reservatórios é essencialmente de pastos, tanto para as usinas com grande pegada hídrica, como para as usinas com pegada hídrica ínfima. Uma análise dos dados de evaporação das diferentes usinas mostra que a diferença das condições para a evaporação não é o fator preponderante para as diferenças das pegadas. A Tabela 22 mostra o desvio padrão dos dados de evaporação em mm para os dados de todas as usinas da AES Tietê S.A., nela é possível observar que não há grande variabilidade entre as usinas considerando os dados de cada mês.

Tabela 22 Média e desvio padrão dos dados de evaporação líquidas para os reservatórios da AES Tietê S.A. Fonte:ONS,2004.

Usina	Evaporação líquida (mm)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Água Vermelha	12	16	30	53	73	74	65	61	58	23	3	27	495
Promissão	16	18	37	62	77	72	59	55	53	22	4	30	505
Ibitinga	19	16	37	63	75	69	55	50	49	23	3	31	490
Bariri	21	16	38	64	74	67	53	47	46	21	2	30	479
Nova Avanhadava	16	20	37	60	77	73	60	56	53	21	4	28	505
Barra Bonita	23	17	38	64	73	64	50	43	42	19	1	30	464
Euclides da Cunha	22	11	25	42	58	52	47	43	41	15	7	24	387
Caconde	18	11	35	49	60	60	54	55	47	17	19	30	455
Limoeiro	22	11	24	45	60	54	46	42	42	21	4	24	395
Média	18,8	15,1	33,4	55,8	69,7	65,0	54,3	50,2	47,9	20,2	5,2	28,2	463,9
Desvio Padrão	3,6	3,3	5,6	8,7	7,9	8,1	6,2	6,9	5,9	2,7	5,4	2,7	44,7

Tabela 23 Participação percentual de cada usina na evaporação e produção de energia total

Usina	Percentual de evaporação	Percentual de geração de energia	Pegada hídrica por usina (litros/kWh)
Água Vermelha	31,88%	64,02%	33,80
Promissão	29,52%	8,14%	246,31
Ibitinga	6,42%	5,56%	78,47
Bariri	3,42%	4,91%	47,26
Nova Avanhadava	12,22%	4,84%	171,30
Barra Bonita	14,77%	4,66%	215,32
Euclides da Cunha	0,05%	3,79%	0,85
Caconde	1,60%	3,14%	34,52
Limoeiro	0,12%	0,95%	8,67

Uma comparação entre a participação da evaporação de cada usina na evaporação total da AES Tietê com a participação na geração de energia da empresa mostra que não há uma relação direta entre esses dois fatores (Tabela 23). Usinas com grande participação na evaporação total possuem baixa participação na produção de energia relativamente, como é o caso de Nova Avanhadava e Barra Bonita. Tal fato reflete em uma pegada hídrica alta, significativamente maior que as demais usinas da empresa.

Outro caso de pegada hídrica bastante elevada é a usina de Promissão, que apesar de ter uma participação mais significativa na produção de energia, possui uma evaporação muito elevada.

Já uma comparação entre a área dos reservatórios e suas pegadas mostra uma relação muito mais direta, uma vez que os dados de evaporação em mm entre as usinas não possuem grande variabilidade (Tabela 24). Apesar da produção de energia estar diretamente relacionada ao volume de água turbinado, outro fator também influi nessa geração, a queda. Assim, a baixa correlação entre a pegada e a geração de energia deve-se as diferenças de quedas entre as usinas.

Tabela 24 Relação entre pegada hídrica e área do reservatório

Usina	Pegada hídrica por usina (litros/kWh)	Percentual da evaporação	Área (km ²)	Percentual da área total
Água Vermelha	33,8	31,9%	549,4	31,3%
Promissão	246,3	29,5%	509,2	29,0%
Ibitinga	78,5	6,4%	114,8	6,5%
Bariri	47,3	3,4%	62,5	3,6%
Nova Avanhadava	171,3	12,2%	212,0	12,1%
Barra Bonita	215,3	14,8%	271,4	15,5%
Euclides da Cunha	0,8	0,0%	1,1	0,1%
Caconde	34,5	1,6%	30,7	1,8%
Limoeiro	8,7	0,1%	2,7	0,2%

A metodologia deste estudo levou em conta a evaporação líquida dos reservatórios, pois acredita-se que esse volume evaporado é o que de fato pode ser atribuído à atividade humana. No entanto, para comparar os resultados com os obtidos com os resultados de MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a), foram calculadas as pegadas utilizando a evaporação real dos reservatórios da AES.

Os dados de evaporação real das usinas foram obtidos por contato direto com o ONS, esse dados são mostrados na Tabela 25. Os resultados das pegadas são mostrados na Tabela 26.

Tabela 25 Evaporação real mensal por usina. Fonte: ONS, 2004.

Usina	Evaporação real (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez

Água Vermelha	167	146	162	142	133	110	99	102	114	124	138	163
Promissão	161	146	160	139	126	100	88	90	101	113	127	154
Ibitinga	157	143	156	135	122	95	82	84	95	109	122	149
Bariri	155	142	154	133	119	92	79	80	91	106	119	146
Nova Avanhadava	163	148	162	140	127	102	89	91	102	115	128	156
Barra Bonita	154	141	151	131	116	89	75	76	87	103	116	145
Euclides da Cunha	148	126	134	121	112	90	80	81	93	110	120	148
Caconde	127	110	123	110	98	83	74	76	85	101	108	137
Limoeiro	153	131	139	127	116	92	80	82	94	112	122	148

Tabela 26 Pegadas hídricas em litros/kWh das usinas da AES Tietê S.A. usando evaporação real.

Usina	Estado	Pegada hídrica por usina (litros/kWh)
Água Vermelha	São Paulo (AES)	106,5
Promissão	São Paulo (AES)	730,8
Ibitinga	São Paulo (AES)	232,0
Bariri	São Paulo (AES)	139,7
Nova Avanhadava	São Paulo (AES)	516,6
Barra Bonita	São Paulo (AES)	627,7
Euclides da Cunha	São Paulo (AES)	3,0
Caconde	São Paulo (AES)	93,5
Limoeiro	São Paulo (AES)	30,6

O resultado da pegada hídrica total da AES considerando a evaporação real é apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 Resultado da pegada hídrica para a AES Tietê S.A. considerando a evaporação real

Pegada Hídrica final	0,205	m ³ /kWh
	204,979	litros/kWh
	56,938	m ³ /GJ

A pegada hídrica considerando a evaporação real, como esperado, é maior que a pegada considerando a evaporação líquida, uma vez que a evapotranspiração real não é descontada. No caso da AES, a pegada considerando a evaporação real é três vezes superior ao resultado final desse trabalho. Assim é possível ver que a evapotranspiração real representa uma parcela importante na evaporação dos reservatórios e que os valores reais de evaporação são significativamente maiores que a evaporação considerada nesse trabalho.

Esse estudo não levou em consideração a evaporação das PCHs que fazem parte do sistema de produção da AES Tietê S.A. pela sua pouca relevância na produção de energia da empresa. No entanto, em um estudo mais amplo, seria interessante averiguar o impacto das PCHs no resultado final da pegada hídrica da eletricidade. No caso do cálculo da pegada média para o Brasil, dado o extenso número de PCHs existentes, recomenda-se a inclusão das mesmas.

7.3. Comparação com demais estudos de pegada hídrica do setor hidrelétrico

Os estudos de pegada hídrica de hidroeletricidade encontrados na literatura consideram para o cálculo apenas a evaporação de reservatórios, sendo essa considerada por eles uma aproximação razoável, uma vez que se espera que a pegada relativa aos produtos necessários para a produção da energia elétrica seja algumas ordens de grandeza inferior. Essa escolha feita pelos demais estudos facilita a comparação dos resultados com os encontrados no presente trabalho.

Em MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a) a metodologia usada contempla a evaporação total para o cálculo da pegada hídrica. A Tabela 28 mostra os resultados encontrados pelos autores para as usinas brasileiras presentes em sua pesquisa, com cálculo de média e desvio padrão.

Tabela 28 Pegadas hídricas em litros/kWh de usinas no Brasil usando evaporação total. Fonte: adaptado de MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a)

Usina	Estado	Pegada Hídrica (litros/kWh)
Sobradinho	Bahia (CHESF)	1436
São Simão	Minas Gerais/ Goiás (cemig)	147
Itumbiara	Minas Gerais/ Goiás (furnas)	189
Tucuruí	Pará (Eletronorte)	178
Itaipu	Paraná/Paraguai	27
Jaguari	São Paulo (cesp)	52

Marimbondo	São Paulo/ Minas Gerais (furnas)	138
Estreito	São Paulo/ Minas Gerais (furnas)	254
Média		303
Desvio padrão		464

A Tabela 29 mostra o cálculo da média e do desvio padrão das pegadas das usinas da AES considerando a evaporação real.

Tabela 29 Média e desvio padrão das pegadas hídricas das usinas da AES considerando evaporação real

Pegada hídrica por usina (litros/kWh)	
Média	275,6
Desvio Padrão	275,2

É possível observar que a média das pegadas hídricas para as usinas representadas na Tabela 28 é bastante próxima a média das usinas da AES Tietê, apresentada na Tabela 29. No entanto, o desvio padrão é grande, mostrando uma alta variabilidade entre os casos.

Com os resultados de MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a) e das pegadas considerando a evaporação real dos reservatórios da AES é possível observar uma tendência para a pegada de hidrelétricas brasileiras. Acredita-se que a média nacional não deva ser distante das duas médias encontradas.

O desvio padrão das pegadas de usinas brasileiras do estudo feito por MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a) é superior ao desvio padrão das pegadas das usinas da AES. Essa diferença não surpreende se levado em conta que as usinas da AES estão em uma mesma região, com dados muito semelhantes de evaporação. As usinas em MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a) estão dispersas pelo território brasileiro, que possui uma grande variabilidade climática. É possível ver em Sobradinho, reservatório localizado no rio São Francisco, na Bahia, semi-árido nordestino, que sua pegada é extremamente alta, devidos aos elevados níveis de evaporação do local.

O resultado de HERATH, *et al.* (2011) para o cálculo da pegada hídrica das usinas da Nova Zelândia utilizando a evaporação líquida é de 2,72 m³/GJ, ou 9,79 litros/kWh. O valor é bastante inferior a pegada da AES, 67,88 litros/kWh. A média anual de evaporação líquida dos reservatórios da Nova Zelândia é de 329 mm/ano (HERATH,

et al.,2011), enquanto a média da evaporação anual para os reservatórios da AES é de 463,9 mm/ano.

A evaporação dos reservatórios na Nova Zelândia é bastante inferior à encontrada nos casos brasileiros, sendo a pegada hídrica igualmente inferior.

MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a) antecipam na conclusão de seu estudo que a utilização da evaporação real para o cálculo da pegada hídrica pode ser questionada por se saber que antes da criação do reservatório já existia uma evaporação para a mesma área. Porém, ele argumenta que deve se ter em mente a definição de pegada hídrica, onde esta não existiria para se referir a uma evaporação adicional, mas para quantificar o volume de água consumido que pode ser associado a um propósito humano específico. Segundo ele, com essa perspectiva, a evaporação real pode ser atribuída ao propósito do reservatório.

Apesar das palavras do próprio criador do conceito de pegada hídrica, foi escolhido o uso da evaporação líquida para o cálculo da pegada, pois, citando o próprio novamente, a pegada hídrica deve quantificar o volume de água consumido que pode ser associado a um propósito humano específico. Acredita-se assim que a evaporação líquida corresponda melhor a esta definição, uma vez que é retirada a parte que evaporaria por razões naturais, ou seja, sem a atividade humana. A evaporação líquida representa o volume de água que de fato foi gasto, sendo esse o valor que pode ser atribuído à atividade humana no caso dos reservatórios.

Diferentemente do estudo feito por MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a) e HERATH, *et al.* (2011), este estudo leva em consideração as variações da área dos reservatórios ao longo do tempo, ainda que feita por uma média de uma série histórica. MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a) realizam os cálculos considerando os reservatórios sempre cheios e atribuem tal escolha à dificuldade na aquisição de dados. Os autores fazem essa consideração em seu artigo e recomendam para estudos futuros levar-se em conta a variação dos reservatórios.

7.4. Água perdida, energia perdida, soluções e viabilidade de reduzir a pegada hídrica

Quando se fala em perda de água a questão é olhar para um volume que poderia ter um uso, mas que não segue seu fim. No caso da evaporação de reservatórios, essa perda de água pode ser vista como uma perda energética.

Para a análise do que representa a evaporação dos reservatórios em perdas energéticas foi feita sua estimativa considerando o volume de evaporação real, a

energia gerada e a capacidade de geração das usinas. A metodologia de cálculo para esta estimativa encontra-se no ANEXO II.

A perda energética em um ano, considerando a evaporação real de todas as usinas e suas capacidades de produção equivalem a 222,83 GWh. Esse valor é equivalente a quase o dobro da usina de Limoeiro. Pode-se dizer, que por evaporação é perdida a energia equivalente à produção de uma hidrelétrica.

Esse resultado chama atenção para o fato de que medidas para reduzir a evaporação de reservatórios talvez sejam economicamente viáveis dada a importância dessas perdas.

Algumas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para a redução de evaporação em reservatórios artificiais. A empresa Australiana Aquatain, desenvolveu o produto *WaterGuard*, um líquido que se espalhado sobre a superfície da água forma um filme muito fino que reduz a evaporação de lago (AQUATAIN, 2014)

WaterGuard é produzida a partir de polímeros que são altamente impermeáveis a gases que inclui o vapor de água. Quando esses polímeros entram em contato com a água, suas moléculas se repelem fortemente, desta forma há um efeito de espalhamento uniforme do produto sobre o reservatório. O filme que se forma sobre a superfície da água é bastante resistente à perturbações, permanecendo eficiente mesmo em caso de ventos fortes e chuva. A ação dos polímeros bloqueia a ação da radiação solar sobre a água do reservatório evitando o aquecimento da água e sua evaporação, Segundo seu fabricante, o *WaterGuard* pode evitar as perdas por evaporação em mais de 50% (idem).

Uma outra tecnologia desenvolvida no mesmo sentido da anterior, o *More Aqua*, consiste em uma mistura de óleos vegetais com vários outros químicos que jogados na água formam uma película ultra-fina, de aproximadamente dois milionésimos de um milímetro de espessura. O *More Aqua* é resultado de pesquisa de cientista israelense com 5 outros professores do MIT e da Tufts University, Segundo fabricante, o produto reduz a evaporação em 75% (MORE AQUA, 2014)

As tecnologias citadas merecem uma análise de viabilidade econômica quando se pensa na ampliação da geração de energia. Pode ser mais barato a implantação de uma dessas tecnologias ao invés da construção de uma nova hidrelétrica. Também é importante levar em consideração não apenas a viabilidade econômica, com também os impactos ambientais causados por um novo empreendimento e os impactos causados pela aplicação da tecnologia. A aplicação da tecnologia pode ter impactos

negativos sobre a biodiversidade no lago ou qualidade da água, por exemplo, e também um impacto positivo, aumentando a disponibilidade hídrica, não só para a usina, mas também para todos os usuários a jusante da represa.

7.5. O papel da pegada hídrica

Nos últimos cinco anos, agências multilaterais e organizações da sociedade civil de abrangência mundial começaram a identificar o setor privado não apenas como um agente consumidor e degradador dos recursos hídricos, mas também como um ator-chave na governança da água, capaz de promover o uso eficiente do recurso e sua conservação (EMPINOTTI e JACOBI, 2013). A alta dependência de setores industriais dos recursos hídricos e os problemas de escassez relativos a esse recurso levam as corporações a voltarem suas atenções às suas práticas que influenciam nos usos da água.

A necessidade de reduzir os usos da água, seja nos volumes agregados ao produto, seja na geração de poluição, levaram algumas empresas a investir no melhor conhecimento de suas atividades através do cálculo de suas pegadas hídricas. Raisio, Lewis, Pepsi-Co, SABMiller, Unilever (EMPINOTTI e JACOBI, 2013) e Natura (FRANCKE e CASTRO, 2013), além da AES Tietê S.A., são exemplos de empresas que utilizaram essa ferramenta para averiguar a pressão que é causada por suas atividades.

Além de calcular os volumes gastos por determinada atividade, o segundo passo da pegada hídrica é a avaliação de sustentabilidade dos processos, onde essa deve ser analisada por uma perspectiva ambiental, social e econômica. Nessa etapa são discutidas as práticas mais adequadas para garantir a disponibilidade hídrica na bacia de estudo. A partir dessa avaliação podem ser traçadas ações, planos ou políticas para redução da pegada hídrica e resolução dos seus problemas causados, que pode incluir a compensação, se dentro da mesma bacia (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

O cálculo da pegada hídrica, com sua proposta de divisão por origem da água utilizada proporciona uma análise contextualizada sobre o significado dos valores obtidos como resultados dentro das bacias onde as atividades estão localizadas. O estudo de análise de ciclo de vida agregado pode proporcionar o mapeamento das atividades e evidenciar pontos críticos do consumo.

Nesse contexto, vale comentar que para o estudo de caso deste trabalho, apesar de esperar-se que a pegada relativa aos produtos consumidos pela AES seja significativamente inferior à pegada relativa à evaporação, tal fato não invalida o

trabalho de análise de ciclo de vida realizado. Essa parte do estudo será útil para a empresa no sentido de entender melhor sua cadeia produtiva, auxiliando no processo de tomada de decisão sobre iniciativas de sustentabilidade. O entendimento dos processos existentes e do quanto cada processo consome de água são informações valiosas que devem ser entendidas e assimiladas pela empresa.

Uma análise interessante que a conclusão do projeto possibilita, porém não será possível de ser feita devido à falta dos dados primários, é a constatação da principal causa do consumo de água pelos produtos. Como as categorias foram divididas em processo, energia, transportes e, ainda dentro delas, foi feita a distinção entre pegada azul, verde e cinza, a análise de tal resultado ajuda na compreensão da realidade e aponta os processos de maior consumo, indicando os principais aspectos a serem trabalhados no caso de necessidade de medidas para a redução.

Uma vez tendo um objetivo claro, seja ele reduzir custo, reduzir a quantidade de consumo de água ou reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a análise de ciclo de vida é uma excelente ferramenta para apontar onde as ações devem ser realizadas, para que a empresa não gaste tempo e dinheiro em medidas que no fim não serão relevantes para o objetivo final.

Por exemplo, quando falamos de pegada de carbono de um produto, geralmente os transportes representam a maior fonte de emissões, uma vez que está basicamente associada à queima de combustíveis fósseis. Assim, se o objetivo da companhia é reduzir a pegada de carbono de seu produto, sem ter a informação precisa das fontes e dos pesos de cada uma delas, esforços podem ser empregados em fatores de pouca relevância. Se um produto em sua cadeia produtiva é muito intensivo em uso de energia elétrica, uma ação intuitiva pode ser a redução do consumo de energia, investindo em novas tecnologias mais eficientes e mais caras. No entanto, a energia elétrica para tal produção, se advinda de fonte hidráulica, terá uma baixa emissão de gases de efeito estufa. Assim, um melhor investimento da empresa para atingir seu objetivo final poderia ser alocado em substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis nos transportes e em uma melhor logística quanto aos transportes entre os fornecedores, buscando empresas parceiras fisicamente mais próximas, reduzindo o número de viagens, etc.

A pegada hídrica relativa aos produtos, embora sensivelmente inferior à pegada relativa à evaporação, é uma parcela passível de gestão por parte da empresa. Desta forma, julga-se importante uma análise em separado.

A parcela da pegada relativa à evaporação dos reservatórios é bastante significativa e faz com que a hidroeletricidade seja uma das fontes energéticas com maior pegada hídrica.

Com o valor da pegada hídrica calculada para a AES é possível fazer uma estimativa do volume de água associado a produção de energia que uma pessoa consumiria caso utilizasse no seu dia a dia exclusivamente a energia da AES.

Considerando o valor de consumo médio brasileiro 161,3 kWh/mês (EPE, 2013c), uma pessoa consumiria indiretamente o equivalente a 11 m³ por mês, que corresponde a 130 m³ por ano. Considerando que o consumo direto médio de água por pessoa é de 200 litros por dia (0,2 m³/dia), o volume de água consumido com energia elétrica seria equivalente ao consumo da mesma pessoa durante 1 ano e 10 meses.

O consumo de água associado à produção de energia elétrica é apenas uma parcela da pegada hídrica indireta de um indivíduo. Todo consumo realizado está associado a um consumo de água. Observando o montante relativo apenas ao consumo de energia, é possível concluir que a pegada indireta de um indivíduo é significativamente maior que a pegada direta.

Uma questão que pode ser levantada aqui é qual o poder de uma informação como essa? Qual o impacto dos resultados dos cálculos de pegadas hídricas nas atitudes das empresas, consumidores e governos? Os estudos de pegada hídrica ainda são muito incipientes, e discussões relativas a essa ferramenta ainda são muito voltadas para seu método em si. Estudos futuros sobre o impacto da informação gerada pelo cálculo da pegada hídrica seriam extremamente relevantes e recomendados. É importante avaliar os desdobramentos em ações das informações disponibilizadas pelos cálculos de pegada hídrica. A etapa de sua avaliação de sustentabilidade é fundamental para que esses estudos não fiquem apenas como uma questão de *marketing* para as empresas e sejam efetivamente traduzidos em novas iniciativas.

O problema de escassez de recursos hídricos é uma questão local, com já citado anteriormente nesse trabalho. Alguns autores como PFISTER AND HELLWEG, 2009; BERGER AND FINKBEINER, 2010 *apud* MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a), sugerem uma alteração no conceito de pegada hídrica, para que essa seja transformada em um índice de impacto ambiental local, multiplicando o volume utilizado por um fator de impacto desse uso, sendo esse fator definido pela escassez de água do local. Desta forma a pegada hídrica representaria uma medida ponderada da utilização do recurso hídrico.

MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a) argumenta que informações importantes são perdidas desta forma. A pegada hídrica foi criada para dar uma medida real da quantidade de água consumida, auxiliando na tomada de decisão sobre utilização dos recursos hídricos.

A criação de um índice que mostra o impacto do consumo de água por uma hidrelétrica não é uma questão simples, pois são diversos os fatores que podem ser incluídos nessa discussão e nem sempre bem definidos e compreendidos. O consumo de água pode impactar o ambiente e a população local em diversos níveis e o índice estaria refém de uma avaliação destes impactos, que tende a ser subjetiva e dependente da abordagem desejada. A pegada hídrica é uma medida real, sem valores subjetivos e isenta da necessidade de interpretação.

Obviamente, não se exclui a ideia da utilização da pegada hídrica combinada com outros fatores ambientais para uma avaliação do impacto da atividade, podendo, e inclusive recomendando-se, a criação de índices que a levem em conta. Porém, deve-se manter o termo pegada hídrica com sua definição original. Seguindo a lógica dos estudos de análise de ciclo de vida, analogamente a pegada de carbono, que é uma medida quantitativa da massa de gases de efeito estufa emitidos, a pegada hídrica encontra-se consistente sendo definida como o volume de água consumido.

A metodologia proposta por HOEKSTRA *et al.* (2011), foi a base utilizada para o presente trabalho, no entanto algumas fragilidades podem ser vistas em seu manual. As indicações de métodos de cálculo são muito genéricas, dando grande liberdade para quem as calcula. Esse grau de imprecisão faz com que haja uma dificuldade na comparação entre pegadas de produtos. Não há um rigor técnico e metodológico. Da mesma forma, o método de cálculo da pegada cinza é bastante impreciso, sem definição de padrões claros.

Uma dificuldade para a pegada hídrica é a ausência de dados locais para seu cálculo. Esses seriam muito importantes, uma vez que os problemas relacionados à água são locais. Uma questão que deve ser mais bem trabalhada no conceito de pegada hídrica é como considerar as condições locais em seu cálculo.

8. Conclusão

O projeto objetivou o cálculo da pegada hídrica de 1 kWh de energia elétrica produzida pela AES Tietê S.A. com uma proposta metodológica da divisão desse cálculo em duas etapas: na pegada relativa aos produtos utilizados e na pegada relativa a evaporação dos reservatório.

Embora os resultados relativos às pegadas dos produtos não tenham sido produzidos, sua metodologia foi desenvolvida, estando pronta para uma simples entrada de dados de consumo da empresa para ser gerado. A elaboração do banco dados (etapa anterior à elaboração do presente projeto de graduação), os cálculos dos fatores de uso da água para a eletricidade e para os transportes podem ser considerados resultados importantes na evolução do estudo de pegada hídrica, sendo o tema ainda pouco explorado no Brasil e no mundo.

O valor da pegada hídrica calculada para a energia hidrelétrica da AES Tietê mostra que o volume de água consumido para a produção de tal energia é, principalmente se comparado com as energias advindas de outras fontes, bastante elevado.

A hidroeletricidade é uma fonte de energia bastante atrativa e considerada renovável pela sua baixa emissão de gases de efeito estufa. De fato, nesse aspecto, as hidrelétricas são uma excelente alternativa. Porém, como visto nesse estudo, seu consumo de água é um dos maiores entre as fontes tradicionais.

As usinas hidrelétricas são considerados aproveitamentos com um uso não consuntivo da água (PNRH,2006). De fato, a água turbinada, que é efetivamente utilizada para a produção de energia, retorna em iguais condições para o curso d'água, não correspondendo a um uso consuntivo. No entanto, para garantir a presença de água durante o período de seca, os reservatórios são criados, gerando uma grande área alagada, com um espelho d'água sujeito aos efeitos de evaporação. A água evaporada é um uso consuntivo e no caso dos reservatórios de usinas está diretamente associada à produção de energia. Desta forma, é possível concluir que a produção de energia de fonte hidráulica possui um grande consumo de água, um dos maiores por unidade de energia produzida entre as fontes de energia mais usadas atualmente.

Pode-se concluir que a pegada hídrica da AES Tietê S.A. está acima do valor considerado médio mundial em, 22 m³/GJ em GLEICK ,1993. Apesar do resultado final da AES ser um pouco inferior em números (18,9 m³/GJ), os métodos de cálculos são diferentes, tendo o método para cálculo da pegada da AES considerado a evaporação líquida. Se compararmos a média mundial com a pegada da AES considerando a evaporação real (56,9 m³/GJ) é possível ver que essa segunda é substancialmente superior. O valor das pegadas das usinas brasileiras em MEKONNEN e HOEKSTRA (2011a) também é bastante superior à média mundial. Assim, conclui-se que provavelmente uma pegada hídrica média brasileira seria superior à média mundial, um resultado que condiz com as condições climáticas do território brasileiro.

Por sua vez, os resultados de HERATH *et al.* (2011), mostram que a pegada hídrica das usinas da Nova Zelândia possuem valor bastante inferior a média mundial. Nesse estudo pode-se observar a grande variabilidade das pegadas entre as usinas. Desta forma, conclui-se que o uso de uma média mundial não é uma boa aplicação devido a grande diferença encontrada entre as usinas estudadas. A pegada hídrica é dependente de fatores como o tamanho da área alagada e produção de energia e esses fatores são específicos de cada usina. Assim, para uma informação precisa é necessário um estudo caso a caso.

A construção de grandes reservatórios para geração hidrelétrica tem sido motivo de discussões e conflitos entre ambientalistas, comunidades afetadas, o governo e o setor elétrico, envolvendo a sociedade como um todo. Alguns casos com grande apelo, como Belo Monte, são um retrato da grandiosidade dos impactos causados por uma hidrelétrica e a percepção cada vez maior da sociedade das questões ambientais.

Uma hidrelétrica pode causar grandes impactos ambientais, sociais e econômicos que devem ser cuidadosamente estudados por especialistas. A pegada hídrica não se propõe a ser um indicador de impacto ambiental ou social, mas sim um indicador de consumo de um recurso natural, no entanto ele pode ser analisado conjuntamente com outros indicadores de impacto para ajudar no entendimento do cenário em questão.

Pela grande variação entre os resultados das pegadas de cada usina é possível concluir, que o uso da média global mais comumente citada de $22\text{m}^3/\text{GJ}$ deve ser feito com ressalvas, principalmente porque a realidade brasileira é bastante diversa. A variação de pegada de diferentes usinas, como mostrado nos resultados, é bastante larga mesmo para aproveitamentos na mesma região, dentro do estado de São Paulo. Acredita-se que a variação seja ainda maior se levada em conta as diversidades climatológicas e as diferentes características de cada usina presentes em território nacional.

A evaporação dos reservatórios é um tema relevante do ponto de vista operacional de uma usina. O processo de tomada de decisão de geração de energia é feito baseado na demanda e nas previsões hidrológicas da bacia. Dentro do contexto de escassez de energia, a avaliação das perdas nos reservatórios a título da evaporação, passa a ter um papel fundamental, tanto nos estudos de planejamento, como na operação dos sistemas existentes (ONS, 2004).

Para futuros estudos recomenda-se o cálculo da pegada hídrica de todas as usinas presentes no SIN. Assim, seria possível o cálculo da pegada hídrica da energia

elétrica consumida pelo SIN, levando em consideração a contribuição de cada usina e das demais fontes energéticas que não a hidráulica nesse cálculo, utilizando a metodologia deste trabalho, considerando a evaporação líquida.

A pegada hídrica pode ser uma poderosa ferramenta pela informação nela contida. Ela dá a possibilidade de uma análise de como as atividades humanas se relacionam com questões de escassez e poluição da água. Pode ser considerada uma ferramenta importante para a gestão ambiental de empresas e governos. Embora a pegada hídrica em si não contenha a informação do que fazer, ela ajuda o entendimento do que pode ser feito.

O conceito de pegada hídrica ainda é muito novo, metodologias estão sendo desenvolvidas e discutidas, o que reflete em poucos estudos já realizados sobre o assunto. Como afirmado por HERATH *et al.* (2011), ainda não existem metodologias consolidadas para o cálculo da pegada hídrica de hidroeletricidade. Assim, esse trabalho pode ser considerado de vanguarda, pois não foram encontrados estudos para pegada hídrica de hidroeletricidade no Brasil.

Para a consolidação da ferramenta é necessário um engajamento dos estudiosos do assunto para a padronização de dados e métodos que possibilitem a comparação entre diferentes processos. A formulação de uma norma ISO para pegada hídrica é um grande passo nesse sentido.

Finalmente, a pegada hídrica pode ser considerada uma ferramenta que surge a partir da valorização da eficiência do uso da água e tem o potencial de gerar informação que podem proporcionar a criação de novas relações sobre o entendimento da importância dos recursos hídricos na cadeia produtiva de nossos bens de consumo. Os desdobramentos desse melhor entendimento podem contribuir para que a água se torne um canal de influência na construção de práticas de governança que limitem os usos dos recursos naturais a fim de garantir um melhor equilíbrio do meio ambiente e que ao mesmo tempo garanta o acesso aos seus usuários, sempre de forma racional.

9. Referências Bibliográficas

ABQUIM, 2012, Anuário da Indústria Química Brasileira. Edição 2011.

AES Tietê S.A., 2008, “Cadastro técnico das usinas hidroelétricas da AES TIETÊ S.A.”

AES Tietê. AES Tietê - Uma Empresa AES Brasil, 2013, <http://www.aestiete.com.br/empresa/Paginas/Perfil.aspx> (acesso em 19 de dezembro de 2013).

ALICE (MDIC), 2013, Base de Dados sobre Comércio Exterior Brasileiro.

ANA, 2013, Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas. Brasília

ANEEL, 2005, Cadernos Temáticos ANEEL: Energia Assegurada. Brasília – DF, Brasil.

ANP, 2011, “ Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2011”.

AQUATAIN, 2014. WaterGuard, líquide blanket to save water [Internet]. Austrália Disponível em: <http://www.aquatain.com/default.html>. Acessado em: 05 de fevereiro de 2014.

BARROS, V. R. 2012, “Avaliação de Evapotranspiração Utilizando o Algoritmo SEBAL e Imagens LANDSAT-TM - Estudo de Caso: Bacia do Rio Piabanha/RJ.” Rio de Janeiro, Brasil.

BRASIL. Lei 10.203/01, de 22 de fevereiro de 2001. Dá nova redação aos arts. 9º e 12 da Lei no 8.723, de 28 de outubro de 1993, que dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores, e dá outras providências. Brasília, 180º da Independência e 113º da República.

BRASIL. Lei 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. Brasília, 184º da Independência e 117º da República.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de

1989. Brasília, 1997.

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2013, ISO 14046 Water footprint – Principles, requirements and guidelines. Disponível em: <http://www.bsigroup.com/en-GB/ISO-14046-Water-footprint--Principles-requirements-and-guidelines/>. Acessado em: 10 de janeiro de 2014.

CETESB, 2013. Águas superficiais, IQA – Índice de qualidade das águas. Disponível em: [http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guasSuperficiais/42-%C3%8Dndice-de-Qualidade-das%C3%81guas-\(iqa\)](http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guasSuperficiais/42-%C3%8Dndice-de-Qualidade-das%C3%81guas-(iqa)). Acessado em: 19 de fevereiro de 2014.

CICOGNA, M.A, 2003, Sistema de Suporte à Decisão para o Planejamento e a Programação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica. Tese de doutorado. UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2013, Uso da Água no Setor Industrial Brasileiro.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2005. Resolução Conama no 357. Disponível em:< www.mma.conama.gov.br/conama>.

CRH-SP, Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2006. Plano Estadual de Recursos Hídricos 2004-2007.

CRH-SP, Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2013. Plano Estadual de Recursos Hídricos 2012-2015.

DANTAS, E.J.C. 2012, Análise Comparativa entre a Pegada Hídrica do Norte de Portugal e a Pegada Hídrica Nacional. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Portugal.

ECOINVENT. Banco de Dados sobre Análise de Ciclo de Vida. Versão 2.2. 2010.

Eletrobrás. “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas.” 2003.

EMPINOTTI, V. L.; JACOBI, P. R., 2013, Novas práticas de governança da água? O uso da pegada hídrica e a transformação das relações entre o setor privado, organizações ambientais e agências internacionais de desenvolvimento. Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 27, p. 23-36, jan./jun. 2013. Editora UFPR.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013a, Anuário Estatístico de energia elétrica 2013, Rio de Janeiro.

EPE– EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013b, Balanço Energético Nacional (BEN) 2013: Ano Base 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/default.aspx>

EPE– EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013c, Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica. Ano VI, nº 70, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FERNANDES, L.C. 2006, Avaliação de diversas equações empíricas de evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão-RJ. Dissertação de Mestrado. COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.

FIRMO, H.T. 2012. Notas de aula do curso de Gestão dos Recursos Hídricos. Escola Politécnica – UFRJ. Dhrima – Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

FRANCKE, I.C.M; CASTRO, J.F.W., 2013, Carbon and water footprint analysis of a soap bar produced in Brazil by Natura Cosmetics. *Water Resources and Industry* 1–2 p. 37–48.

GERBENS-LEENES, P.W.; VAN LIENDEN, A.R.; HOEKSTRA, A.Y.; VAN DER MEER, TH.H.; “Biofuel scenarios in a water perspective: The global blue and green water footprint of road transport in 2030”, *Global Environmental Change*, n.22, pp 764–775, 2012.

GERBENS-LEENES, P.W; HOEKSTRA, A.Y.; TH VAN DER MEER. “The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply.” *Ecological Economics*, 2008.

HENRIQUES Jr, M. F. “Potencial de Redução de Emissão de Gases de Efeito Estufa pelo Uso de Energia no Setor Industrial Brasileiro.” o Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Maio de 2010.

HERATH, I; DEURER, M; HORNE, D; SINGH, R; CLOTHIER, B; “The water footprint of hydroelectricity: A methodological comparison from a case study in New Zealand”, *Journal of Cleaner Production*, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.05.007, 2011.

HOEKSTRA, A. Y. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Delft, Holanda: Value of Water Research Report Series No 12, UNESCO-IHE, 2002.

HOEKSTRA, A.Y. CHAPAGAIN, A.K., The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products, *Water International* n 33, pp 19-32, 2008.

HOEKSTRA, A.Y; CHAPAGAIN, A. K; ALADAYA, M.M; MEKONNEN, M.M., 2011, The Water Footprint Assessment Manual. In: ISBN: 978-1-84971-279-8 hardback, London • Washington, DC.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Key World Energy Statistics, 2010.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Key World Energy Statistics, 2011.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Key World Energy Statistics, 2012.

MARCATO, A. “As Usinas Hidrelétricas”. Juiz de Fora, 2010..Disponível em: http://www.ufjf.br/andre_marcato/files/2010/06/Apostila-Parte-II.pdf Acessado em: 27 de novembro de 2013

MEC - MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO CONSELHO NACIONAL DE EDUCAÇÃO CONSELHO PLENO, Resolução nº 2, de 15 de junho de 2012, Estabelece as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental.

MEKONNEN, M.M; HOEKSTRA, A.Y., 2010, The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Value of Water Research Report Series No. 47, UNESCO-IHE, Delft, Holanda.

MEKONNEN, M.M; HOEKSTRA A.Y., 2011a, “The water footprint of electricity from hydropower.” Hydrology and Earth System Sciences, n.16, pp 179–187, UNESCO-IHE.

MEKONNEN, M.M; HOEKSTRA, A.Y., 2011b, National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption, Value of Water Research Report Series No. 50, UNESCO-IHE, Delft, Holanda.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011, Desenvolvimento de Matriz de Coeficientes Técnicos para Recursos Hídricos no Brasil – Relatório Final dos Coeficientes Técnicos de Recursos Hídricos das Atividades Industriais e Agricultura Irrigada. Relatório Técnico 6.

MORE AQUA, 2014. More Aqua Incorporated. Estados Unidos, Cambridge. Disponível em: <http://www.moreaqua.com/index.html>. Acessado em: 05 de fevereiro de 2014.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, Volume Útil dos Principais Reservatórios. 2013. Disponível em: http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx. Acessado em: 11 de agosto de 2013.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. “Evaporação Líquida nas Usinas Hidrelétricas.” Rio de Janeiro, 2004.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. "Inventário de Dados Técnicos de Aproveitamentos Hidroelétricos." s.d.

PAS 2050 - PUBLICLY AVAILABLE SPECIFICATION, Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services, 2011.

CBH PCJ - Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivarí e Jundiáí, 2008. Plano de Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivarí e Jundiáí.

SÃO PAULO. Lei n.º 9.034, de 27 de dezembro de 1994. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH, a ser implantado no período 1994 e 1995, em conformidade com a Lei nº 7663, de 30 de dezembro de 1991, que instituiu normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos.

SEA DISTANCES - VOYAGE CALCULATOR. Disponível em: <http://sea-distances.com>

SIGRH, Sistema de Informação para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br>. Acessado em: 19 de fevereiro de 2014.

VON SPERLING, M., 2005, Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte.

WFN – WATER FOOTPRINT NETWORK, 2008, Disponível em: <http://www.waterfootprint.org/?page=files/home>. Acessado em: 17 de fevereiro de 2014.

ANEXO I

1. Escolha dos produtos

O primeiro passo para o cálculo da parcela da pegada hídrica relativa aos produtos utilizados pela empresa para a geração de energia elétrica foi a identificação dos mesmos e a limitação de um determinado número de produtos a serem considerados no cálculo com critério em sua relevância no uso.

O levantamento dos produtos mais utilizados foi feito pela equipe da FBDS junto à AES Tietê com apoio das áreas de sustentabilidade, operacional e compras da empresa. Foram selecionados 103 produtos mais utilizados nas atividades da empresa, divididos em 15 grupos, tais como: cabos de aço, cabos de cobre, óleos, graxas e conectores, assim como suas embalagens, além dos combustíveis.

2. Elaboração do banco de dados

A seguir serão descritos os passos para a elaboração do banco de dados de análise de ciclo de vida dos produtos utilizados pela AES Tietê S.A. no período de um ano.

2.1. Busca pelos dados de Análise de Ciclo de Vida e construção dos mapas de processo

O primeiro passo para a construção do banco de dados, foi a elaboração do mapa de processo simplificado de cada material listado. Mapas de processos são esquemas que representam a cadeia produtiva dos produtos. Para construção dos mesmos foram buscadas informações na literatura e nas fichas dos seus fabricantes.

Com a construção dos mapas de processos simplificados, feito em linhas gerais, buscou-se ter um guia para a coleta de dados específicos e para os cálculos futuros da pegada.

Para o desenho de um mapa de processo deve-se dar importância primeiramente aos insumos mais significativos, atentando para seus próprios constituintes, processo de fabricação e transporte.



Figura 16 Mapa de processos simplificado dos combustíveis derivados de petróleo.

A Figura 16 mostra um exemplo de mapa de processo simplificado construído. Nesse mapa não constam os transportes e as embalagens de cada produto, porém os mesmos devem ser considerados no cálculo da pegada e serão averiguados na próxima fase do estudo. Mapas de processo, como o exemplo, foram construídos para todos os demais produtos da lista previamente organizada.

Uma vez tendo relacionado os produtos a serem considerados no cálculo da pegada, segundo PAS 2050, norma relativa a pegada de carbono, a metodologia a ser seguida prevê o contato direto com os fornecedores para obtenção de dados primários sobre o ciclo de vida dos produtos. Dados primários são geralmente de melhor qualidade, e expressam a realidade específica do produto considerado, proporcionando um resultado mais condizente com a realidade e com as condições com que o produto em questão é produzido. Pretendia-se inicialmente utilizar a resolução espaço-temporal nível C.

O contato com os fornecedores foi realizado, no entanto a grande maioria alegou motivos de sigilo para não participar do projeto. Outros não responderam à demanda realizada e um menor grupo alegou não possuir as informações requeridas. Com a ausência de informações primárias sobre o ciclo de vida dos produtos dos fornecedores da AES Tietê, os mapas de processos foram construídos com base em pesquisa bibliográfica.

Para tal, foi utilizado um banco de dados internacional sobre análise de ciclo de vida de grande aceitação no meio acadêmico e corporativo, o OpenLCA da Ecoinvent.

A Ecoinvent, empresa com base na Suíça, tem sido citada em inúmeros estudos realizados sobre o tema. Seu banco de dados é alimentado por uma série de artigos científicos publicados em periódicos internacionais, sendo a função de a Ecoinvent reunir tais informações em uma plataforma única. Os dados da Ecoinvent foram

comprados pela FBDS em sua versão mais atual no momento do projeto, Ecoinvent v2.2 (ECOINVENT, 2010).

A Ecoinvent divide seus dados em diversas categorias, como metais, produtos químicos, petróleo, transportes e etc. Em cada uma dessas categorias há uma grande lista de produtos disponível. Para cada um desses produtos são fornecidas as matérias primas necessárias à sua confecção, as energias utilizadas, divididas por fonte, os resíduos gerados e as emissões de poluentes, transportes, assim como as quantidades de todas essas informações. Dentro das matérias primas empregadas, encontramos a informação de água consumida e na informação de geração de poluentes, aparece a DBO produzida.

Cada matéria prima de um produto, excetuando as de base e os recursos naturais, tem agregada a si um outro processo produtivo, com novas matérias primas, energia para produção, resíduos, poluentes e necessidade de transportes. Desta forma, percorrendo a cadeia pelo caminho inverso, ou seja, iniciando pelo produto final desejado, retornando em sua cadeia produtiva pelas matérias primas descritas, foi construído o banco de dado da análise de ciclo de vida dos produtos a serem considerados.

As matérias primas utilizadas, as energias consumidas e suas fontes, os transportes realizados e a água consumida diretamente no processo produtivo são colocados como *inputs* para o processo de fabricação de determinado produto, reportado pela Ecoinvent. Os resíduos gerados e os poluentes estão reportados em *outputs*. Na Figura 17 é mostrada a apresentação dos dados da Ecoinvent tendo como exemplo a gasolina.

Process: petrol, unleaded, at refinery (openlca)

Allocation method: None

Inputs

Flow	Category	Flow property	Unit	Resulting amount	Uncertainty	Default
lime, hydrated, packed, at plant	constr...	Mass	kg	3.3405E-5	Logarith...	
lubricating oil, at plant	chemic...	Mass	kg	2.367E-5	Logarith...	
methyl tert-butyl ether, at plant	chemic...	Mass	kg	0.02493	Logarith...	
molybdenum, at regional storage	metals ...	Mass	kg	7.8702E-8	Logarith...	
naphtha, at regional storage	oil / fu...	Mass	kg	0.038171	Logarith...	
nickel, 99.5%, at plant	metals ...	Mass	kg	1.2243E-8	Logarith...	
nitrogen, liquid, at plant	chemic...	Mass	kg	7.8644E-4	Logarith...	
palladium, at regional storage	metals ...	Mass	kg	7.963E-8	Logarith...	
platinum, at regional storage	metals ...	Mass	kg	2.5211E-9	Logarith...	
propylene glycol, liquid, at plant	chemic...	Mass	kg	1.0716E-5	Logarith...	

Outputs

Flow	Category	Flow property	Unit	Resulting amount	Uncert
Barium	water / surface water	Mass	kg	2.4433E-8	Logarit
Barium	water / ocean	Mass	kg	4.2376E-8	Logarit
Benzene	water / ocean	Mass	kg	9.6534E-9	Logarit
Benzene	water / surface water	Mass	kg	5.5453E-9	Logarit
Benzene	air / high population...	Mass	kg	5.1406E-6	Logarit
Benzene, ethyl-	water / surface water	Mass	kg	4.8224E-11	Logarit
Benzene, ethyl-	air / high population...	Mass	kg	1.2852E-6	Logarit
Benzene, ethyl-	water / ocean	Mass	kg	8.3897E-11	Logarit
BOD5, Biological Oxygen Demand	water / surface water	Mass	kg	1.721E-6	Logarit
BOD5, Biological Oxygen Demand	water / ocean	Mass	kg	2.9851E-6	Logarit

Figura 17 Apresentação dos dados da Ecoinvent para a gasolina.

Na etapa descrita no parágrafo anterior, alguns limites foram levados em conta. Foram desconsideradas matérias primas que correspondessem a menos de 1% do total de matérias primas utilizadas, sendo esse o critério do insignificante usado nessa fase.

Com os mapas de processo simplificados e as informações do banco de dados da Ecoinvent, foram construídos os mapas de processos de cada produto.

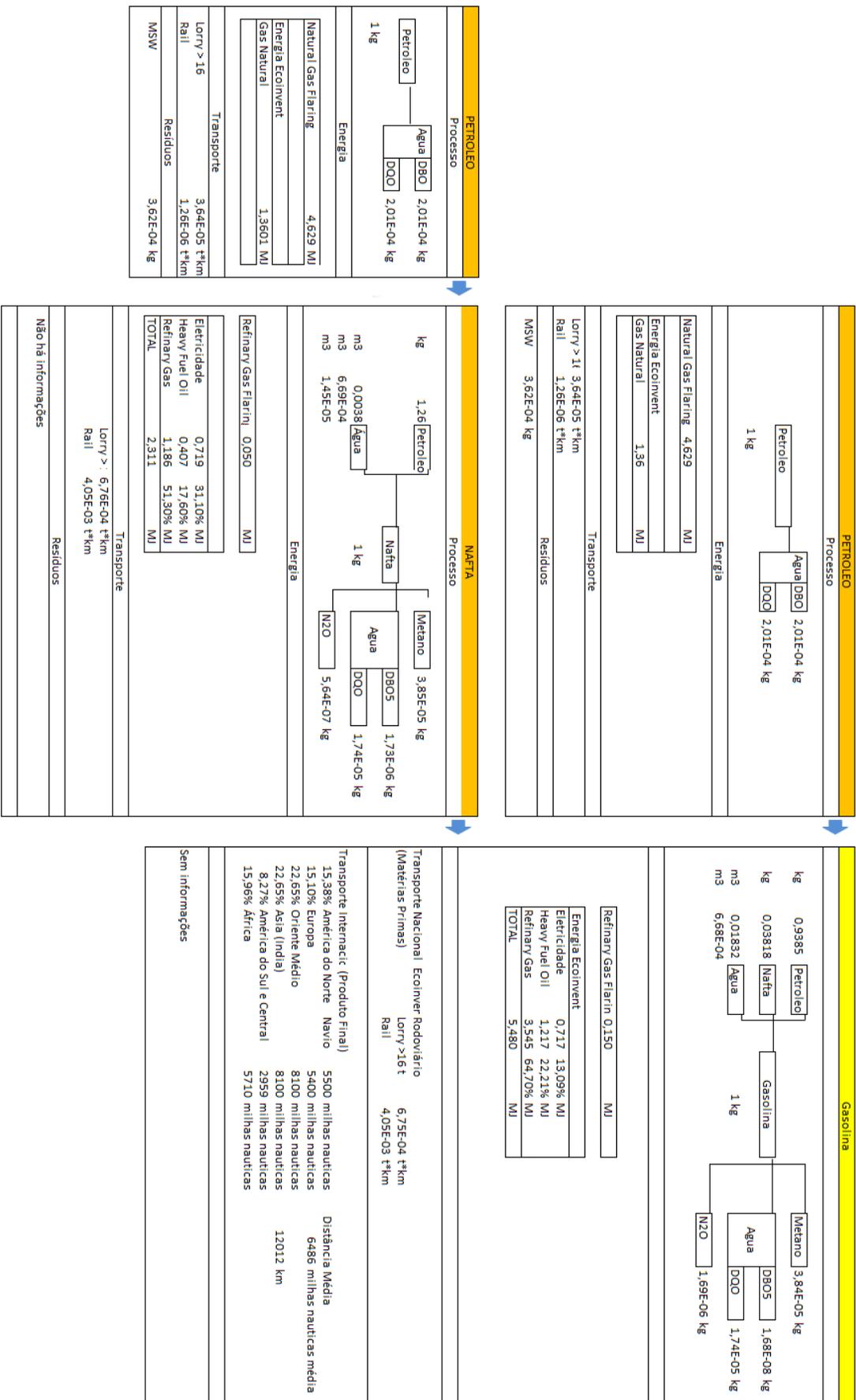


Figura 18 Mapa de processo completo para a gasolina. Fonte: baseado nos dados ECOINVENT, 2010.

A Figura 18 mostra um mapa de processo completo com todos os inputs e outputs considerados significantes, prontos para o cálculo da pegada hídrica.

Esses *inputs* e *outputs* foram divididos em quatro categorias dentro de cada processo: processo, energia, transporte e resíduos. Na categoria processos entram as matérias primas e geração de poluição. Na categoria energia entram os MJ gastos para a produção da respectiva etapa do produto, separados por fonte. Os transportes são a soma de todos os deslocamentos feitos para a realização do processo, transporte de matérias primas. A informação dada pela EcolInvent relativa ao transporte é exibida em tonelada.kilometro para cada categoria de transporte, uma combinação de dois fatores que influem no uso de combustível, a quantidade transportada e a distância percorrido pelo meio de transporte.

Diversas categorias de meio de transporte estão presentes no banco de dados da EcolInvent. Para cada uma dessas categorias, o valor de 1 (uma) tonelada.Km é associada a um consumo de combustível especificado. Essa quantidade de combustível foi transferida para as tabelas dos produtos, transformando a informação dada em ton.Km para kg de combustível consumido.

A última categoria, resíduos, engloba os resíduos produzidos. A Figura 19 mostra uma etapa de processo com mais detalhes, no caso o nafta, etapa para fabricação da gasolina.

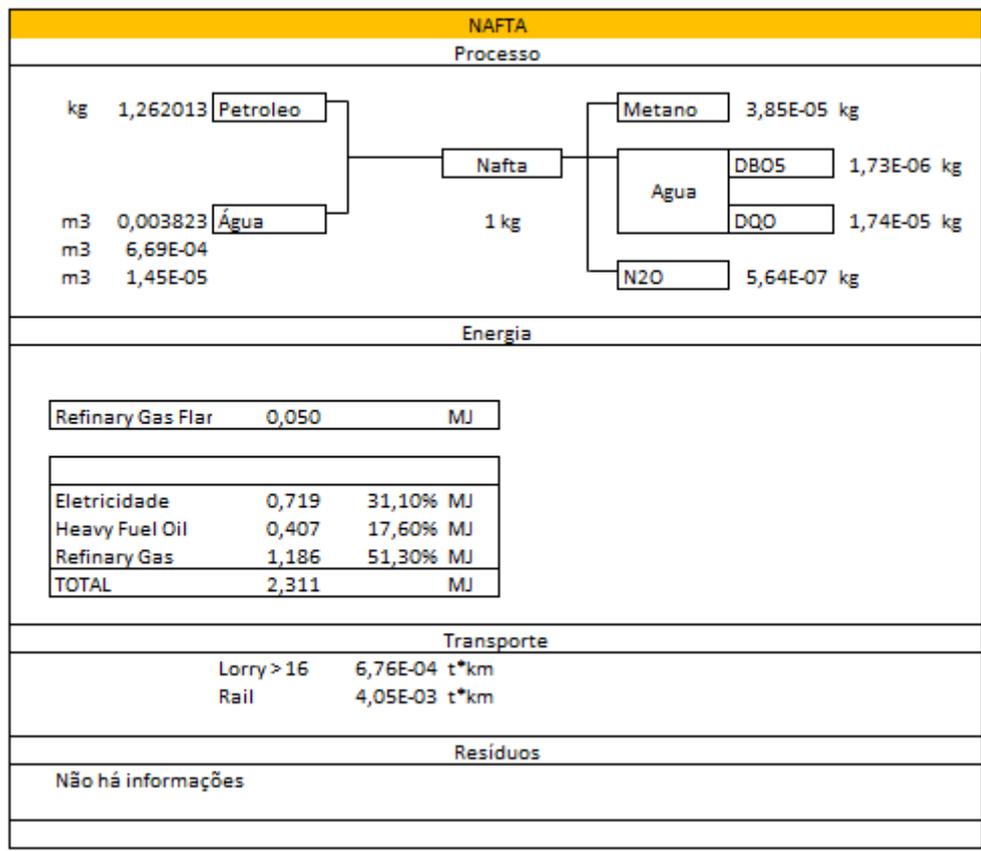


Figura 19 Inputs e outputs do nafta, etapa do processo da gasolina. Fonte: baseado nos dados ECOINVENT, 2010.

2.2. Distinção dos produtos nacionais e importados

Apesar de a Ecoinvent fornecer uma ampla base de dados, as informações, em sua grande maioria, são construídas para a realidade Europeia. Para a utilização dos dados foi necessária a etapa de adaptação dos dados à realidade brasileira.

As adaptações dos dados da Ecoinvent à realidade brasileira foram feitas por intermédio de uma ampla pesquisa em banco de dados fornecidos pelo governo federal brasileiro, bem como trabalhos acadêmicos e artigos publicados.

A principal diferença entre os produtos produzidos no Brasil e no exterior que podem causar impacto no resultado da pegada hídrica está na energia elétrica consumida e nos combustíveis usados. A gasolina e o diesel no Brasil possuem teores de etanol e biodiesel, respectivamente, que devem ser levados em conta no cálculo da pegada hídrica, uma vez que a produção agrícola possui um elevado consumo de água. A principal fonte de energia elétrica no Brasil é a hidroeletricidade, como já comentado anteriormente, com consumo elevado de água.

Desta forma, para cada produto foram construídos dois mapas de processo, um para a produção nacional e outro para os produtos importados. Os dois fluxogramas têm

como base o mapa de processo simplificado desenhado na fase anterior, levando em conta as peculiaridades na produção nacional encontradas nas pesquisas utilizando os diferentes fatores de consumo de água para a energia elétrica e para os transportes.

No caso dos produtos importados os fatores de consumo de água usados foram as médias mundiais. Assim, o passo a seguir foi diferenciar a quantidade de cada produto produzida no país e a quantidade importada. Essa informação foi obtida através da pesquisa de consumo aparente de cada produto, que corresponde à produção nacional + importação – exportação. Tais informações foram buscadas principalmente em Aliceweb e ABIQUIM (2012).

A produção nacional menos exportação representam o consumo nacional de produtos produzidos internamente e a quantidade de produtos importados representam o consumo nacional de produtos produzidos fora do país. Desta forma, para cada produto, esta informação foi levada em conta no cálculo da pegada.

Para os produtos importados foram averiguados os principais países de origem, dados pelo Aliceweb e incorporados à pegada o consumo dos transportes marítimos feitos. Foram calculadas as distâncias entre os principais portos de cada país e o Porto de Santos usando como ferramenta o site SEA DISTANCES - VOYAGE CALCULATOR CITAR LINK.

Os consumos de água para a produção de cada item foram divididos em matérias primas, energia e transporte. A água consumida na categoria matéria prima diz respeito à água consumida diretamente na produção, sendo a água agregada ao produto e a água utilizada para diluir a poluição gerada. No cálculo da água consumida relacionada à energia foi considerada somente a parcela relativa ao consumo de energia elétrica. Na categoria transportes, as pegadas são relativas à produção dos combustíveis.

ANEXO II

1. Cálculo da representação da evaporação em perda energética

A casa de máquinas de uma usina hidrelétrica é composta por conjuntos de unidades geradoras com características semelhantes. Algumas das principais características de uma casa de máquinas e de suas unidades geradoras são definidas em CICOGNA, 2003.

N_c: número de conjuntos de unidades geradoras da usina.

N_j: número de unidades geradoras do conjunto j.

P_{ef,j}: Potência efetiva de cada unidade geradora do conjunto j. A potência efetiva é definida como máxima potência ativa possível de ser gerada, em regime permanente, na unidade geradora a partir da sua entrada em operação.

H_{ef,j}: altura de queda efetiva de cada unidade geradora do conjunto j. É definida como a menor queda líquida sob a qual a unidade, em operação, desenvolve a sua potência efetiva.

Q_{ef,j}: engolimento efetivo de cada unidade geradora do conjunto j. É definido como a vazão turbinada que submetida à queda efetiva produz a potência efetiva.

Os parâmetros definidos foram encontrados no Inventário de Dados Técnicos de Aproveitamentos Hidroelétricos (ONS, sd.) e são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 Coeficientes das usinas Fonte: ONS, sd.

	Nc	Nj(1)	PotEf(1) (MW)	QEf(1) (m ³ /s)	HEf(1) (m)	Nj(2)	PotEf(2) (MW)	QEf(2) (m ³ /s)	HEf(2) (m)
Caconde	2	1	41,2	48	101	1	39,2	46	101
Euclides da Cunha	1	4	27,2	37	88	0	0	0	0
Limoeiro	1	2	16	89	21,7	0	0	0	0
A. Vermelha	1	6	232,7	493	53,5	0	0	0	0
Barra Bonita	1	4	35	189	21,4	0	0	0	0
Bariri	1	3	48	257	22,1	0	0	0	0
Ibitinga	1	3	43,8	234	21,2	0	0	0	0
Promissão	1	3	88	431	23,1	0	0	0	0
Nova Avanhandava	1	3	115,8	477	27,5	0	0	0	0

A potência de uma hidrelétrica pode ser descrita como:

$$P = \rho g n Q H$$

Sendo,

ρ : massa específica da água (kg/m³)

g : aceleração da gravidade (m/s²)

n : fator que engloba as perdas da turbina e nos condutos forçados

Q : vazão (m³/s)

H : queda (m)

Como ρ , g e n são constantes, serão englobadas em um único fator k . Assim temos:

$$P = k Q H$$

Com os dados de potência, queda e vazão efetiva de cada usina foi possível calcular o k correspondente.

Tabela 31 Valores de k.

Usina	k(1)	k(2)
Caconde	0,0085	0,0084
Euclides da Cunha	0,0084	-
Limoeiro	0,0083	-
A. Vermelha	0,0088	-
Barra Bonita	0,0087	-
Bariri	0,0085	-
Ibitinga	0,0088	-
Promissão	0,0088	-
Nova Avanhandava	0,0088	-

A energia gerada pelo sistema instalado será igual ao mesmo k vezes o volume de água vezes a queda.

$$E = kVH$$

Desta forma foi calculado o volume efetivo, volume correspondente a vazão efetiva permanente durante o período de um ano. Esse é o volume que tem capacidade de gerar energia elétrica na usina.

Com o valor da energia gerada em um ano, foi calculado também o volume real turbinado por cada usina no ano.

Tabela 32 Volume efetivo e volume utilizado

Usina	Energia gerada (Gwh)	Energia gerada (10 ⁶ MJ)	Volume efetivo (10 ⁶ m ³)	Volume utilizado (10 ⁶ m ³)
Caconde	405	1.458	2.964	1.699
Euclides da Cunha	489	1.760	4.667	2.395
Limoeiro	123	443	5.613	2.463
A. Vermelha	8.262	29.743	93.283	63.014
Barra Bonita	601	2.164	23.841	11.683
Bariri	634	2.282	24.314	12.220
Ibitinga	717	2.581	22.138	13.790
Promissão	1.050	3.780	40.776	18.513
Nova Avanhandava	625	2.250	45.128	9.268

Uma comparação entre o volume evaporado de cada reservatório e a diferença entre o volume efetivo e volume utilizado (que representa o volume adicional que poderia ser turbinado pela usina para geração de energia) mostra que esse primeiro é menor que o segundo em todas as usinas, assim todo o volume evaporado teria capacidade de geração por parte da usina se pudesse ser evitada (*Tabela 33*).

Tabela 33 Comparação volume efetivo e volume evaporado

Usina	Volume efetivo - Volume utilizado (10⁶ m³)	Volume evaporado (10⁶ m³)
Caconde	1266	38
Euclides da Cunha	2273	1
Limoeiro	3150	4
A. Vermelha	30269	880
Barra Bonita	12158	377
Bariri	12094	89
Ibitinga	8348	166
Promissão	22263	767
Nova Avanhandava	35860	323

Como todo volume evaporado poderia ser utilizado para produção de energia, foi calculado com os valores de queda efetiva e k a quantidade de energia que poderia ser gerada com o volume evaporado em um ano, caracterizando o equivalente da evaporação em energia perdida.

Usina	Energia perdida (MJ)	Energia perdida (Gwh)
Caconde	32.493.856	9,03
Euclides da Cunha	1.072.118	0,3
Limoeiro	677.606	0,19
A. Vermelha	415.339.513	115,37
Barra Bonita	69.856.323	19,4
Bariri	16.542.404	4,6
Ibitinga	31.141.562	8,65
Promissão	156.681.615	43,52
Nova Avanhandava	78.383.733	21,77
Total	802.188.732	222,83

Essa estimativa não levou em conta os níveis dos reservatórios nos meses e nem a distribuição da evaporação no ano. Dada às diferenças sazonais, pode ser que algum mês um volume de água que não fosse evaporado precisasse ser vertido por falta de capacidade de assimilação da usina. No entanto, como o volume que ainda poderia

ser utilizado pela usina é mais que o dobro do volume evaporado, acredita-se que as usinas teriam capacidade de gerar energia utilizando esse volume. Assim, essa estimativa de perda energética parece razoável no contexto das usinas da AES Tietê S.A.