



## GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS EMPRESARIAIS E DE GESTÃO CORPORATIVA E DA INOVAÇÃO E DA EDUCAÇÃO E DE REGULAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO - GEC

### A CONTRIBUIÇÃO DA PEGADA HÍDRICA NA GESTÃO DO RECURSO ÁGUA PARA O SETOR ELÉTRICO

**DENISE FERREIRA DE MATOS(1); IGOR PINHEIRO RAUPP(1); JOÃO GABRIEL GONÇALVES DE LASSIO(2); ALEXANDRE MOLLIÇA MEDEIROS(1); KATIA C GARCIA(1); LUCIANA ROCHA LEAL DA PAZ(1); JULIANO LUCAS SOUZA DE ABREU**  
**CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL(1); COPPE/UFRJ(2)**

#### RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo relatar as contribuições que os estudos de pegada hídrica podem dar a gestão do recurso água para o setor elétrico. A primeira parte do trabalho apresenta uma revisão conceitual dos estudos de pegada hídrica. Na segunda parte do trabalho é feito um levantamento de estudos de pegada hídrica aplicados à atividade de geração hidroelétrica, termoeétrica, solar fotovoltaica, eólica e transmissão de energia elétrica. Finalmente são destacadas as especificidades do cálculo de pegada hídrica para cada um destes tipos de projetos, enfatizando as contribuições alcançadas com cada tipo de estudo realizado.

#### PALAVRAS-CHAVE

Avaliação de Ciclo de Vida; Pegada Hídrica; Indicadores de Sustentabilidade; Empreendimentos; Setor Elétrico

#### 1.0 INTRODUÇÃO

Uma importante ferramenta para melhoria de processos e produtos nas empresas é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A ACV, que conforme norma ABNT NBR ISO 14040 (1), “enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais [...] ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento, pós-uso, reciclagem até a disposição final [...]”. Num estudo de ACV são obtidos indicadores relacionados às entradas e saídas do sistema ao longo de suas etapas e considerando sua cadeia de valor, tais como: consumo de energia, consumo de recursos naturais, uso do solo, emissões para o ar, emissões para as águas e resíduos sólidos. Para cada um destes indicadores são quantificados aspectos ambientais relevantes, de acordo com o objetivo e escopo de cada estudo desenvolvido, variando de sistema para sistema. Com essas informações é possível definir ações de gestão para melhoria da performance ambiental e aumento de eficiência dos processos sem o risco de transferir impactos entre diferentes etapas. O método de ACV mostrou-se particularmente eficaz no cálculo dos indicadores de sustentabilidade do tipo “pegada”.

Os indicadores do tipo “pegada” têm como origem a preocupação com a sustentabilidade ambiental das atividades humanas do ponto de vista do levantamento da sua capacidade biológica de manutenção, destacando-se as pegadas ecológica, hídrica e de carbono. O nexo água-carbono-energia compõe uma área de pesquisa interdisciplinar que produz informações úteis para as empresas do setor elétrico, que enfrenta requisitos de sustentabilidade crescentemente exigentes. Em vista das características do setor elétrico nacional, os estudos de pegada hídrica podem fornecer subsídios importantes para definir estratégias de uso e consumo da água.

Segundo a norma ISO 14.046 (2), uma avaliação da pegada hídrica pode ajudar a: a) avaliar a magnitude dos impactos ambientais potenciais relacionados à água; b) **identificar oportunidades de reduzir os impactos ambientais potenciais relacionados à água associados aos produtos em diferentes estágios do seu ciclo de vida, bem como os processos e organizações**; c) **gestão estratégica de riscos relacionados à água**; d) **promover a eficiência hídrica e a otimização da gestão da água em produtos, processos e níveis organizacionais**; e) informar aos tomadores de decisão na indústria, governo ou órgãos não governamentais sobre os seus impactos ambientais potenciais relacionados à água (por exemplo, com o propósito de planejamento estratégico, definição de prioridades, projeto ou redesenho de produto ou processo, decisões sobre investimento de recursos); f) fornecimento de informações consistentes e confiáveis, baseadas em evidências científicas para relatar os resultados da pegada hídrica.

Alguns conceitos são importantes para definir metodologias de levantamento da pegada hídrica. Como exemplo destacam-se os conceitos de: pegada hídrica azul, cinza e verde; e pegada hídrica de consumo direto e de consumo indireto. A pegada hídrica azul está relacionada ao consumo de água de superfície ou subterrânea fresca; pegada hídrica cinza indica o nível de poluição da água doce associada ao processo de produção; e a pegada hídrica verde se refere ao volume de água da chuva consumido durante o processo produtivo, sendo mais relevante para produtos agrícolas e florestais (3). Já a diferenciação entre consumo direto e indireto relaciona-se a água consumida na geração de energia e da água incorporada nos insumos de matéria-prima, incluindo aquele para produção, processamento e transporte de material combustível (4).

O presente trabalho tem como objetivo relatar as contribuições que os estudos de pegada hídrica podem dar a gestão do recurso água para o setor elétrico. A primeira parte do trabalho apresenta uma revisão conceitual dos estudos de pegada hídrica. Na segunda parte do trabalho é feita uma introdução aos estudos de pegada hídrica aplicados à atividade de geração hidroelétrica, termoelétrica, solar fotovoltaica e eólica de energia elétrica. São destacadas as especificidades do cálculo de pegada hídrica para diferentes tipos de projetos do setor elétrico, enfatizando a contribuição para a gestão ambiental das empresas com o acompanhamento destas informações.

## 2.0 REVISÃO CONCEITUAL - ESTUDOS DE PEGADA HÍDRICA

O conceito de pegada hídrica foi introduzido em 2002 por Arjen Hoekstra na reunião de peritos internacionais sobre o comércio de água virtual realizada em Delf, Holanda. A pegada hídrica das nações foi avaliada quantitativamente por Hoekstra & Huang (5) e, posteriormente, de forma mais abrangente, por Hoekstra & Chapagain (6). O termo Pegada Hídrica foi escolhido por Hoekstra em analogia à pegada ecológica (3). A Pegada Hídrica foi introduzida com o propósito de ilustrar as relações pouco conhecidas entre o consumo humano e o uso da água, tal como também entre o comércio global e a gestão de recursos hídricos. Para Hoekstra (7), o ponto de partida para esta pesquisa se deu com o descontentamento com o fato de que a gestão de recursos hídricos é vista, comumente, como uma questão local ou no máximo como o problema que ocorre no âmbito de uma bacia hidrográfica (3).

Existem duas abordagens principais para a ampla avaliação da pegada hídrica: A primeira é a *Water Footprint Assessment* (WFA), desenvolvida por Hoekstra et al. (8) e promovida pela *Water Footprint Network*, que mapeia três pegadas hídricas: azul, verde e cinza e avalia a sustentabilidade, eficiência e equitabilidade do uso da água. A segunda abordagem encontra-se sistematizada pela norma ISO 14.046 (2), utilizando o método de ACV para o cálculo. As duas abordagens compartilham conceitos similares e estão divididas em quatro etapas, mas diferenciam-se, pois a avaliação da pegada hídrica na abordagem WFA é feita comparando atividades ou produtos com uma referência, ou mesmo com a disponibilidade de água na bacia, e inclui a análise de disponibilidade hídrica, conforme Figura 1. A ACV, por sua vez, também usa os indicadores quantitativos na fase de inventário, mas seu uso mais significativo é na fase de avaliação de impacto, que tem por foco três áreas de proteção: saúde humana, impactos nos ecossistemas e esgotamento de recursos, para as quais eventualmente são avaliadas a escassez hídrica (9).

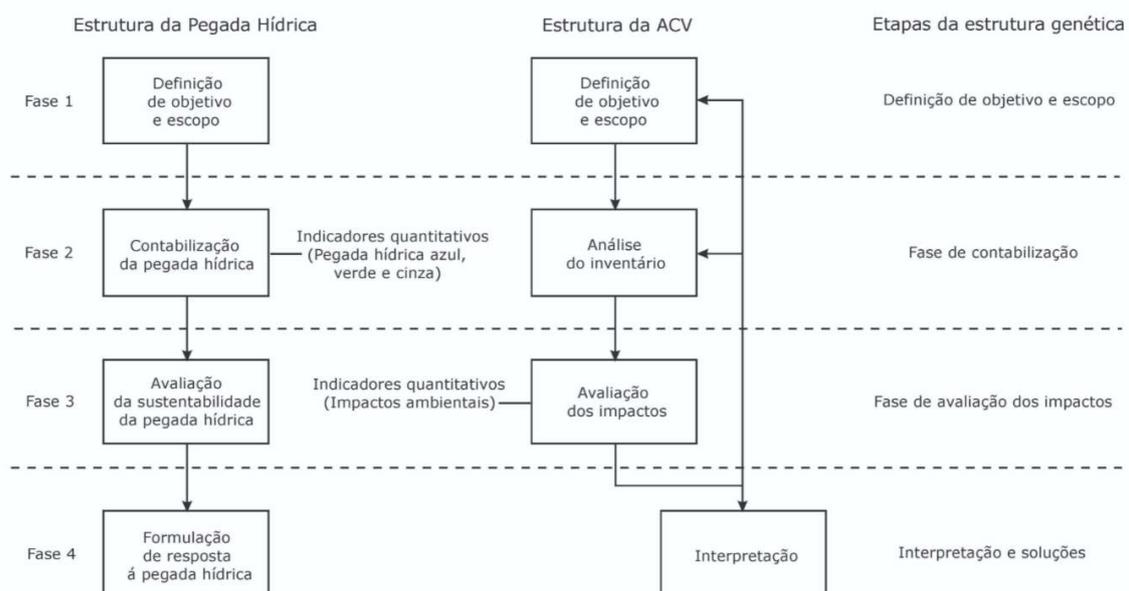


FIGURA 1: Pegada Hídrica e ACV em relação aos indicadores quantitativos. Fonte: (9)

### 2.1 Abordagem WFA (Water Footprint Assessment)

A pegada hídrica de um produto é definida como o **volume de água doce usado para produzi-lo, medido em toda a cadeia de abastecimento**. É um indicador multidimensional, mostrando os volumes de consumo de água por fonte e os volumes poluídos por tipo de poluição. Os componentes de uma pegada hídrica total são especificados geográfica e temporalmente. A definição para consumo da água refere-se à **perda de água do corpo hídrico disponível na superfície do solo em uma área de captação**. As perdas ocorrem quando a água evapora, retorna para outra área de captação ou para o mar ou é incorporada a um produto.

A pegada hídrica azul refere-se ao consumo de recursos hídricos azuis (água doce superficial e subterrânea) ao longo da cadeia de abastecimento de um produto. A pegada hídrica verde refere-se ao consumo de recursos hídricos verdes (água da chuva desde que não escoe). A pegada hídrica cinza se refere à poluição e é definida como o volume de água doce necessário para assimilar a carga de poluentes, dadas as concentrações naturais de fundo e os padrões de qualidade da água existentes no ambiente.

Outra diferenciação importante é a pegada hídrica direta e indireta. Para identificar a pegada direta e indireta de um determinado objeto de estudo é preciso identificar as etapas da cadeia de suprimento e considerar que o consumo é direto para o objeto em questão, e indireto quando representa uma etapa anterior da cadeia. A pegada hídrica operacional (ou direta) de um negócio é o volume de água doce consumido ou poluído devido às próprias operações. A pegada hídrica da cadeia de abastecimento (ou indireta) de uma empresa é o volume de água doce consumido ou poluído para produzir todos os bens e serviços que constituem os insumos de produção da empresa. Em vez do termo 'Pegada hídrica empresarial' também se pode usar os termos 'pegada hídrica corporativa' ou 'pegada hídrica organizacional'. A Figura 2 apresenta um esquema com a composição da pegada hídrica de um negócio.

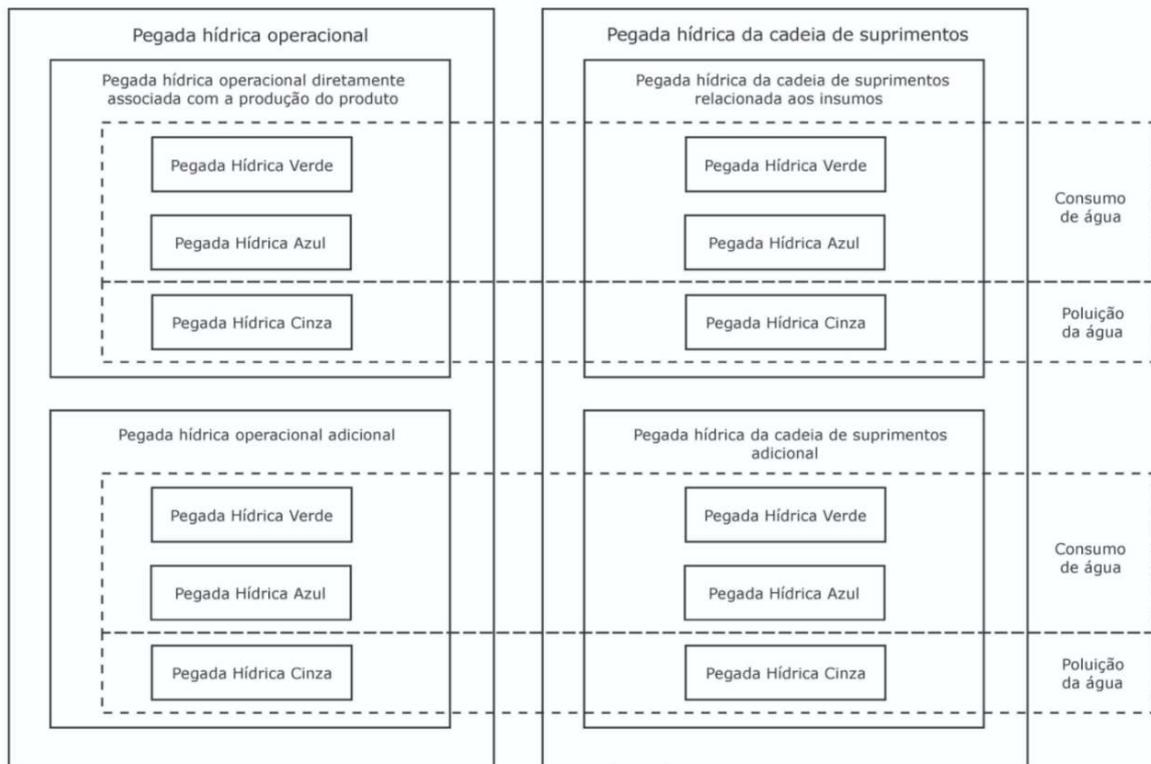


FIGURA 2: Composição da Pegada Hídrica de uma Empresa. Fonte: (8)

No cálculo da pegada hídrica de uma empresa, há um forte foco em fazer a distinção entre a pegada hídrica operacional (direta) e pegada hídrica (indireta) da cadeia de abastecimento. Isso é altamente relevante de uma perspectiva da política, porque uma empresa tem controle direto sobre sua pegada hídrica e influência indireta na pegada hídrica da cadeia de abastecimento. A Tabela 1 apresenta exemplos de atividades das empresas em dois níveis hierárquicos, direto e indireta e operacional e administrativo.

TABELA 1: Exemplos de componentes da pegada hídrica de um negócio / empresa / unidade produtiva.

Pegada Hídrica da Unidade		Pegada Hídrica da Cadeia de Suprimento	
Operação	Administração	Operação	Administração

Água incorporada ao produto	Consumo de água relacionada ao uso em cozinha, banheiros, jardinagem, trabalhos de limpeza etc.	Pegada hídrica dos ingredientes dos produtos comprados pela empresa	Pegada hídrica da infraestrutura (materiais de construção, etc.)
Água consumida ou poluída por processos de lavagem		Pegada hídrica dos itens comprados pela empresa para processar seu produto	Pegada hídrica de materiais e energia para uso geral
Água com poluição térmica pela refrigeração			

Fonte: (8)

## 2.2 Abordagem ACV (Avaliação de Ciclo de Vida)

### 2.2.1 Principais Conceitos

A segunda abordagem, da Organização Internacional de Padronização (ISO) padrão ISO 14046: 2014 (2), é usada para determinar os potenciais impactos ambientais relacionados ao uso da água ao longo do ciclo de vida (abordagem ACV) de um produto, processo ou organização. Pela norma conceituam-se como pegada hídrica e avaliação da pegada hídrica, a métrica que quantifica os impactos ambientais potenciais relacionados com a água e respectivamente a compilação e avaliação das entradas, saídas e os impactos ambientais potenciais relacionados com o uso da água por um produto, processo ou organização. A avaliação da pegada hídrica tem também como características a inclusão das dimensões geográficas e temporais relevantes, quantificação do uso da água e as mudanças na qualidade da água, e a utilização do conhecimento hidrológico e climatológico (2).

A avaliação da pegada de hídrica inclui as quatro fases da avaliação do ciclo de vida:

1. Definição do objetivo e escopo;
2. Análise de inventário da pegada hídrica;
3. Avaliação de impacto da pegada hídrica; e
4. Interpretação dos resultados.

A definição do objetivo consiste na descrição da aplicação prevista dos resultados do estudo, as razões para a realização do estudo, o público-alvo, bem como se o estudo é uma avaliação de um único aspecto ou parte de um estudo de ACV. O escopo do estudo deve ser coerente com o objetivo da avaliação da pegada hídrica, estabelecendo os limites e alcance da avaliação, a unidade funcional a ser utilizada, a abrangência temporal e geográfica, a resolução do estudo, incertezas e limitações, entre outros.

As fronteiras do sistema, definidas na fase 1, determinam quais processos unitários serão incluídos na análise de inventário da pegada hídrica (fase 2) e avaliação de impacto da pegada hídrica (fase 3). A exclusão de etapas do ciclo de vida, processos, entradas ou saídas só é permitida se não afetar significativamente as conclusões gerais do estudo. As exclusões devem ser claramente identificadas, bem como as razões e as implicações das mesmas devem ser explicadas.

Quando o estudo não inclui a fase 3 (avaliação do impacto da pegada hídrica), é denominado de Inventário da pegada hídrica. Vale ressaltar que os resultados da análise de inventário da pegada hídrica não são relatados como pegada hídrica. A Figura 3 ilustra as etapas do estudo de pegada hídrica.

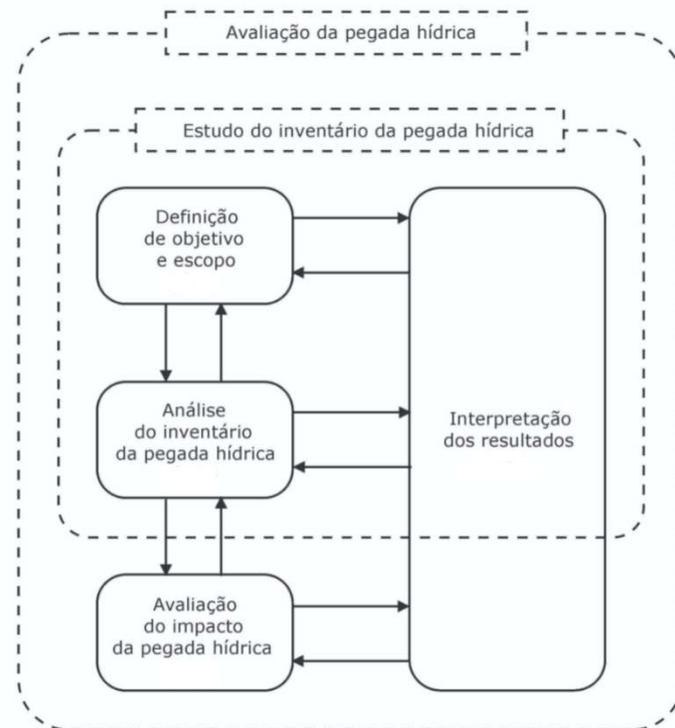


FIGURA 3: Etapas do Estudo de Pegada Hídrica abordagem ACV. Fonte: (2)

Os impactos relacionados com a água podem ser representados por um ou mais parâmetros que quantificam os impactos ambientais potenciais do sistema de produto, processo ou organização relativos à água. Assim, tem-se: 1) indicador de pegada hídrica – relacionado a uma única categoria de impacto, por exemplo, escassez hídrica e 2) perfil de pegada hídrica, que compreende diversos indicadores, tais como escassez hídrica, eutrofização aquática, acidificação aquática ecotoxicidade aquática, poluição térmica, toxicidade humana (devido à poluição da água) etc.

O método de avaliação de impacto da pegada hídrica deve considerar os impactos ambientais potenciais devido às alterações na quantidade e/ou qualidade da água, causadas pelo sistema em estudo. Alterações na qualidade da água podem ter efeitos diretos sobre a disponibilidade de uso subsequente ou mesmo sobre os usos possíveis para a água liberada. A avaliação de impacto da pegada hídrica deve considerar as condições locais e, se for apropriado, relacionar com questões regionais e globais mais amplas. Aspectos temporais, incluindo a sazonalidade, devem também ser considerados, quando relevante.

A interpretação dos resultados deve incluir a identificação das questões-chave apontadas pelo estudo a partir dos resultados da avaliação da pegada hídrica, como por exemplo quais processos têm contribuição significativa para o cálculo da pegada hídrica, mecanismos ambientais mais afetados, fluxos elementares que têm maior contribuição para os resultados etc.; avaliação da completeza, sensibilidade e consistência dos dados; considerações sobre aspectos geográficos e temporais; conclusões, limitações e incertezas.

### 2.2.2 Métodos e Indicadores para o Cálculo de Pegada Hídrica numa Abordagem ACV

Para avaliar os impactos da pegada hídrica, existem, atualmente, diversos métodos de cálculo disponíveis que convertem os resultados do inventário em indicadores relacionados a problemas ambientais decorrentes das mudanças na quantidade e/ou na qualidade da água causadas pelo sistema em estudo. Esses problemas incluem escassez hídrica, eutrofização hídrica, ecotoxicidade aquática, acidificação, poluição térmica e toxicidade humana devida à poluição da água (11).

De um modo geral, os métodos de avaliação de impacto da pegada hídrica podem ser classificados em dois grupos principais: métodos de ponto médio e métodos de ponto final. O primeiro grupo se atém a analisar um problema ambiental referente à água, enquanto o segundo vai além e relaciona tal problema a danos sobre a qualidade do ecossistema, reserva de recursos minerais e saúde humana (11).

O ReCiPe 2016 (12) é um dos principais métodos de cálculo disponíveis uma vez que inclui categorias de impacto da pegada hídrica de natureza tanto qualitativa quanto quantitativa. Além disso, integra e harmoniza as abordagens

de ponto médio e ponto final em uma estrutura consistente. Sob uma perspectiva de escassez hídrica, Hoekstra et al. (13) fornecem um método baseado em uma relação consumo-disponibilidade.

Paralelamente, o método AWARE (*Available Water Remaining*) (14) pode ser usado como um indicador de ponto médio para avaliar o potencial de privação à água para os seres humanos e o ecossistema. É a recomendação da UNEP/SETAC para avaliar o impacto de escassez hídrica e o método mais indicado para utilização no Brasil (15). Existem outros métodos de avaliação de impacto da pegada hídrica disponíveis. A seleção do mais adequado, assim como a escolha das categorias de impacto, deve se dar com base no objetivo e escopo do estudo (11).

Uma questão importante para realizar os estudos de pegada hídrica utilizando a abordagem ACV é a existência de inventários regionais para suprir de informações secundárias o levantamento de informações, assim como métodos de avaliação de impactos que também sejam adaptados a realidades regionais, o que é considerado uma lacuna, principalmente para as regiões periféricas do mundo. Tal situação não é impeditiva para a realização dos estudos, mas insere uma incerteza a mais nos resultados dos estudos.

Um estudo de Martínez-Arce et al. (16) teve como objetivo realizar um levantamento dos estudos de pegada hídrica no continente latino-americano. Inicialmente, a pesquisa foi desenhada para encontrar estudos avaliando a pegada hídrica de produtos fabricados em qualquer país da América Latina seguindo a ISO 14040/44/46, no entanto, a busca mostrou poucos resultados com essas características, visto que a maioria dos estudos na América Latina utilizou a abordagem WFA, avaliando não só produtos, mas também regiões geográficas ou setores econômicos inteiros. Um grupo de pessoas interessadas respondeu a pesquisa que permitiu a identificação das categorias de impacto mais utilizadas para o desenvolvimento de estudos de pegada hídrica na América Latina. As categorias de impacto mais citadas foram: escassez de água doce, ecotoxicidade de água doce, disponibilidade de água doce e eutrofização da água doce. Para estas categorias de impacto foi realizada uma análise AHP entre os participantes com o objetivo de definir os métodos de avaliação de impactos mais recomendados para realizar o cálculo dos indicadores. O Quadro 1 mostra os resultados e a ordem de apresentação dos indicadores é decrescente da preferência dos usuários, o percentual ao lado do nome do método indica quantos dos que calculam o indicador usam o método citado.

QUADRO 1: Métodos de avaliação de impactos recomendado pelos grupos interessados consultados.

Ordem	Indicador	Método Recomendado
1	Escassez de água doce	AWARE (51%)
2	Disponibilidade de água	Water Availability Footprint (59%)
3	Ecotoxicidade de água doce	USEtox (75%)
4	Eutrofização de água doce	ReCiPeMidpoints (55%)

Fonte: (16)

### 3.0 ESTUDOS DE PEGADA HÍDRICA DE EMPREENDIMENTOS DO SETOR ELÉTRICO

De acordo com Hoekstra & Champagain (17), de um total de 7.451 bilhões de metros cúbicos de água consumidos, 85,7% corresponderam ao consumo do setor agrícola, 9,6% ao setor industrial e 4,6% ao setor doméstico. Assim, um maior número de estudos de pegada hídrica aborda produtos do setor da agropecuária. No levantamento realizado por Martínez-Arce et al. (16), citado anteriormente, de trinta e oito referências obtidas, apenas quatro estavam relacionadas a empreendimentos do setor elétrico. Entre os setores industriais a geração de energia elétrica é um dos que pode apresentar pegada hídrica significativa.

Utilizando os dados secundários disponíveis no banco de dados Ecoinvent, versão 3.2 e o método ReCiPe (2016) disponível para uso no software SIMAPRO versão 9.0 foram calculados os consumos de água das principais fontes de geração de energia elétrica da matriz brasileira por kWh, sempre que possível adaptadas para o Brasil. Com base nos valores obtidos foi possível identificar entre os processos que compõem todo o ciclo de vida de cada fonte, aqueles que mais contribuem para a pegada hídrica de cada uma delas. A Tabela 2 apresenta este resultado.

TABELA 2: Principais processos consumidores de água associado a geração de 1 kWh, tipo de consumo de água do principal processo e grau de controle do principal processo.

Fonte	Processos	Etapa	% do Consumo	Tipo	Grau de Controle
UHE	Evaporação	OP	99,7	Água azul	Direta
EOL	Água incorporada à estrutura de concreto armado (~45%), fibra de vidro (~20%) e cobre (~12%)	IMPL	99,7	Água azul	Indireta
SOL	Água incorporada aos painéis fotovoltaicos	IMPL	~100	Água azul	Indireta
BAG	Água usada na refinaria (não especifica a função)	OP	~100	Água azul/cinza	Direta
LEN	Água incorporada à matéria-prima lenha	OP	81,9	Água verde	Indireta
NUC	Água usada na usina (não especifica a função)	OP	99,7	Água azul/cinza	Direta
GCS	Água usada na usina (não especifica a função)	OP	99,6	Água azul/cinza	Direta
GCC	Água usada na usina para resfriamento	OP	98,8	Água cinza	Direta

CVP	Água usada na usina para resfriamento Água incorporada ao carvão	OP	99,3	Água azul/cinza	Direta/Indireta
-----	---	----	------	-----------------	-----------------

Fonte: Elaboração própria

Legenda: UHE – hidrelétrica; EOL – eólica; SOL – solar; BAG – térmica a bagaço de cana; LEN – térmica a lenha; NUC – nuclear; GCS – térmica a gás natural ciclo simples; GCC – térmica a gás natural ciclo combinado; térmica a carvão; OP - operação; IMPL – implantação.

Destaca-se que para os levantamentos de dados com a finalidade de calcular a pegada hídrica de projetos de geração termoelétrica é importante levar em conta os componentes da pegada cinza, ou seja, além dos dados relativos às características do efluente que deve ser disposto, deve-se conhecer as características do corpo d'água receptor e a regulamentação quanto a padrões de qualidade de água local/regional, visando estimar a quantidade necessária de água para garantir a assimilação do efluente pelo corpo receptor sem que haja violação dos padrões estabelecidos. Além disso, pela identificação quanto ao grau de controle do empreendedor sobre a pegada hídrica dos empreendimentos, é significativo notar que o processo que é o maior consumidor de água para as fontes eólica, solar, lenha e carvão (pelo menos em parte) corresponde à pegada indireta, ou seja, está atrelada a sua cadeia de suprimento.

Um levantamento de diferentes artigos com o cálculo da pegada hídrica de várias fontes de geração de energia elétrica apresenta uma outra particularidade própria de estudos de ACV e como consequência, de estudos de pegada hídrica: uma variação grande entre os resultados, conforme exemplifica a Tabela 3.

TABELA 3: Pegada hídrica de diferentes fontes em diferentes artigos científicos (em m<sup>3</sup> por unidade funcional).

Fonte	Fronteira	Unidade Funcional	Dados / método	CVP	GN	NUC	UHE	EOL	SOL
<b>Result. Próprios</b>	Extração das matérias-primas até a destinação final dos resíduos	1 MWh	Ecoinvent 3.2 / ReCiPe 2016	2,76	0,6-0,9	2,99	29,3	0,3	2,68
<b>(18)</b>	Produção de materiais ao descomissionamento	1 MWh	Ecoinvent 3.0 / AWARE	1,5*	12,2*	-	615,6*	1,3*	23,9*
<b>(19)</b>	(Meta-análise)	1 MWh	-	2,22	0,59	2,3	4,96	0,04	0,33
<b>(20)</b>	Cadeia de suprimento de combust., Construção e operação das tecnologias	1 TJ	Literatura / Próprio	495,1	247,1	678,3	15100	1,3	140

Fonte: Elaboração própria

\*Valores em world.m<sup>3</sup>/unidade funcional, unidade utilizada pelo método AWARE (14).

Nos estudos consultados em comum observa-se que a fonte hidroelétrica é a que apresenta maior pegada hídrica, e a fonte eólica a menor. Contudo, a variação entre o maior e o menor valor e as posições intermediárias apresentam grande variação em diferentes trabalhos, e são grandes as variações quando se comparam os valores de pegada hídrica de uma mesma fonte em estudos diferentes. Nunca é demais frisar que tal se dá em função de diferentes fronteiras adotadas por estudo, diferentes métodos de cálculo dos impactos, incertezas dos dados, entre outros fatores.

#### 4.0 CONCLUSÕES

Da apreciação das duas abordagens de cálculo, Boulay et al. (9) salienta que existem sinergias que podem ser aproveitadas. Na fase de inventário, os indicadores quantitativos da pegada hídrica da abordagem WFA especialmente de água azul, podem ser usados na fase de inventário da ACV, e as informações das bases de dados usadas no inventário da ACV podem também ajudar as análises da pegada hídrica WFA a serem mais precisas, especialmente em relação a produtos industriais. Na fase de avaliação de impacto, um indicador pode ser desenvolvido com as melhores práticas de cada método, incluindo o indicador de água azul da pegada hídrica WFA e o indicador de escassez de água usado na ACV. Além disso, na fase de interpretação, a ACV pode se beneficiar da avaliação de sustentabilidade e formulação da resposta da pegada hídrica para construir sua interpretação dos resultados mais robusta.

Como ponto de partida para uma caracterização da pegada hídrica das atividades do setor elétrico utilizando a abordagem ACV, sugere-se a avaliação da adequação dos quatro indicadores selecionados no estudo de Martínez-Arce et al. (16), utilizando os métodos recomendados pelos grupos de interesse, adicionando ainda um quinto indicador, de consumo de água propriamente dito, como forma de criar uma base comum de medida que não depende de diferenças locais e regionais.

No que diz respeito aos empreendimentos de geração de energia elétrica, a geração hidroelétrica tem como principal processo consumidor de água doce a evaporação a partir do espelho d'água do reservatório formado pelo barramento de água. Como consequência, uma série de questões são levantadas. A primeira delas é quanto a alocação da pegada hídrica de reservatórios de usos múltiplos de acordo com as suas diversas finalidades. Inicialmente,

considerava-se a integralidade da evaporação ao uso primordial do reservatório (13), que no caso das usinas hidrelétricas seria para geração de energia. Apesar de não existir uma orientação formal, os métodos mais proeminentes alocam a evaporação de acordo com o volume de água requerido por cada uso (21) ou através da atribuição de valor econômico a cada uso múltiplo do reservatório (22). A segunda questão refere-se à consideração da evaporação líquida ou bruta para cálculo da pegada hídrica. Arjen Hoekstra, que introduziu o conceito de pegada hídrica, defende a consideração da evaporação bruta devido a própria definição e significado de pegada hídrica (13). Já a abordagem líquida reduz a evaporação da superfície do reservatório devido à evapotranspiração do estado "natural" antes da construção da barragem (23). Os autores que defendem esta opção vão além, e discutem se os reservatórios são realmente consumidores ou se seriam coletores de água, uma vez que aumentam a disponibilidade de água, principalmente, em regiões de escassez hídrica (24).

No outro extremo, a geração eólica apresenta menor pegada hídrica, o que faz com que um menor número de estudos específicos sobre o tema seja produzido para este tipo de empreendimento. Estudos sobre geração eólica com uma maior abrangência dos impactos selecionados devem conter indicadores relacionados a pegada hídrica, por ser um impacto considerado relevante de ser caracterizado. E em contextos de maior escassez hídrica, até mesmo para um projeto de geração eólica pode ser um requisito avaliar a quantidade de água necessária durante a etapa de instalação, etapa onde se concentra o consumo de água para este tipo de empreendimento.

Para empreendimentos de geração termelétrica a combustíveis fósseis é indispensável contemplar o consumo de água cinza, o que requer maior detalhamento das informações com um enfoque local/regional, identificando características dos efluentes, requisitos para diluição, caracterização do corpo receptor e padrões de qualidade da água estabelecidos pela legislação. O conceito de água cinza também se aplica quando ocorre o descarte de grande volume de água no corpo hídrico alguns graus acima da temperatura ambiente, provocando impactos nos ecossistemas aquáticos. Este efeito se dá principalmente nas plantas de geração termelétrica que trabalham com ciclo aberto de resfriamento, pois o volume de água utilizado para o resfriamento nesta tecnologia é de tal magnitude que potencializa o impacto sobre a temperatura do corpo receptor, como visto em Chini et al.(25).

De forma mais geral, a grande variação entre os resultados obtidos em diferentes trabalhos que realizam o cálculo da pegada hídrica usando a abordagem de ciclo de vida demonstra a importância da realização de estudos por projeto e adequados à realidade de cada empresa/região, de forma a possibilitar a adoção de respostas adequadas às condições objetivas de cada unidade produtiva, auxiliando a gestão ambiental das empresas e contribuindo para o aprimoramento das condições de sustentabilidade de forma geral.

Na próxima etapa do trabalho, já em andamento, as constatações obtidas nesta primeira parte do estudo estão sendo utilizadas como subsídios para a proposição de uma metodologia de cálculo de pegada hídrica de empreendimentos de geração de energia elétrica no Brasil. Posteriormente a metodologia proposta será testada com aplicação em estudos de caso selecionados.

## 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABNT NBR ISO 14040 (2014). Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.
- (2) ISO 14046 (2014). Environmental Management Water Footprint Principles Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.
- (3) Silva V., Aleixo D., Neto J., Maracajá K., Araújo L. (2012). Uma medida de sustentabilidade ambiental: pegada hídrica. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental 17(1).
- (4) Zhu Y. (2020). Life-cycle-based water footprint assessment of coal-fired power generation in China. Journal of Cleaner Production 254. Elsevier.
- (5) Hoekstra A., Hung P. (2002). Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade, Value of Water Research Report Series No.11, UNESCO-IHE, Delft.
- (6) Hoekstra A., Chapagain A. (2007). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resources Management 21 (1), 35–48.
- (7) Hoekstra A. (Ed.) (2003). Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, Delft.
- (8) Hoekstra A., Chapagain A., Aldaya M., Mekonnen M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. Ed. Earthscan, London, UK. 10.4324/9781849775526.
- (9) Boulay A., Hoekstra A., Vionnet S. (2013). Complementarities of Water-Focused Life Cycle Assessment and Water Footprint Assessment. Environmental Science & Technology. 2013, 47, 11926–11927.
- (10) ISO 14044 (2006). Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.
- (11) ABNT NBR ISO 14046 (2017) Gestão Ambiental – Pegada Hídrica – Princípios, Requisitos e Diretrizes
- (12) Huijbregts M., Steinmann Z., Elshout P., Stam G., Verones F., Vieira M., Hollander A., Zijp M., van Zelm R. (2016). ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization. The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment
- (13) Hoekstra A., Mekonnen M., Chapagain A., Mathews R., Richter B. (2012). Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. PLoS ONE, 7
- (14) Boulay A., Pfister S., Motoshita M., Schenker U., Benini L., Gheewala S., Harding K. (2016). Water use related impacts: Part A: Water scarcity. In: Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators, Vol 1, pp. 101–115. Paris: United Nations Environment Programme.
- (15) Castro A., Andrade E., Ugaya C., Figueiredo M. (2019). Escassez hídrica. In: Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro/RAICV; Ugaya C., Neto J., Figueiredo M. (Org.). Brasília: Ibict.
- (16) Martínez-Arce et al (2018) Water Footprint (ISO 14046) in Latin America, State of the Art and Recommendations for Assessment and Communication. Environments, 5, 114
- (17) Hoekstra A., Chapagain A. (2008). Globalization of Water: Sharing the Planet'S Freshwater Resources; Oxford: Blackwell Publishing.
- (18) Kabayo J., Marques, P., Garcia R., Freire F. (2019). Life-cycle sustainability assessment of key electricity generation systems in Portugal. Energy 176.
- (19) Jin Y., Behrens P., Tukker, A., Scherer L. (2019). Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 115.
- (20) Mekonnen M., Gerbens-Leenes P., Hoekstra A. (2015). The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. Env. Sci., 1, pp. 285-297
- (21) Bakken T., Modahl I., Raadal H., Bustos A., Arnøy S. (2016). Allocation of water consumption in multipurpose reservoirs. Water Policy.
- (22) Hogeboom R., Knook L., Hoekstra A. (2018). The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. Advances in Water Resources, Volume 113, Pages 285-294.
- (23) Scherer L., Pfister S. (2016). Global water footprint assessment of hydropower. Renew. Energy, 99, pp. 711-720
- (24) Bakken T., Killingveit Å., Alfredsen K. (2017). The water footprint of hydropower production—state of the art and methodological challenges. Global Challenges, 1(5):1-8.

- (25) Christopher M. Chini, Lauren H. Logan, Ashlynn S. Stillwell (2020). Grey water footprints of U.S. thermoelectric power plants from 2010–2016. *Advances in Water Resources*.145 (2020).

## DADOS BIOGRÁFICOS



Denise Matos é pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, da área de meio ambiente, mais especificamente estudos socioeconômicos; atua em estudos e desenvolvimento de metodologias para avaliação de impactos socioambientais destacando a atividade de geração transmissão de energia elétrica, e ainda no desenvolvimento de indicadores ambientais e de sustentabilidade corporativa com foco na área socioambiental.

Especializações: Mestrado em Estudos Populacionais e Pesquisas Sociais - ENCE (Escola Nacional de Estatística), atualmente doutoranda do Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ, com foco em estudos de Avaliação de Ciclo de Vida.

## (2) IGOR PINHEIRO RAUPP

Doutor e mestre em Engenharia civil pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ, 2019 e 2008) e Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ, 2004). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), atuando principalmente nos seguintes temas: planejamento da expansão de sistemas hidrotérmicos, aproveitamentos hidroelétricos, operação de sistemas hidroelétricos, controle de cheias, inventário hidrelétrico, inclusão da avaliação de impactos ambientais na expansão da matriz, índice de vulnerabilidade e métodos multicritério.

## (3) JOÃO GABRIEL GONÇALVES DE LASSIO

João Gabriel Lasso é doutorando do Programa de Planejamento Energético da COPPE (PPE/COPPE/UFRJ), mestre em Génie de la Mobilité Durable, especialidade Transport et Développement Durable, pela École Nationale de Ponts et Chaussées, e graduado em Engenharia Civil pela UFRJ. No seu doutorado, se dedica a Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida de fontes renováveis de energia, incorporando aspectos econômicos e sociais aos ambientais da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Atualmente, é bolsista do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) da Eletrobras, atuando em estudos acerca de indicadores de sustentabilidade e impactos socioambientais associados à cadeia de geração de energia elétrica.

## (4) ALEXANDRE MOLLICA MEDEIROS

Alexandre Mollica Medeiros é Mestre em Planejamento Energético e Ambiental pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (PPE/COPPE/UFRJ), Bacharel em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Trabalha como pesquisador do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) desde 2002. Atua principalmente nos seguintes temas: avaliação de emissões e remoções de gases de efeito estufa, inventários corporativos de gases de efeito estufa, sustentabilidade empresarial. Desde 2010 é coordenador do Grupo de Trabalho de Estratégia Climática das Empresas Eletrobras

## (5) KATIA C GARCIA

Katia Cristina Garcia é Engenheira Química, formada pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, com Pós-Doutorado em Adaptação às Mudanças Climáticas pela Université Grenoble Alpes da França (IEPG-UJF-UPMF), Doutora em Planejamento Energético e Ambiental pela COPPE/UFRJ e Mestre em Engenharia de Produção pela COPPE/UFRJ, possuindo também MBA em Desenvolvimento Gerencial pela FGV/SP. Pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e Coordenadora do Comitê de Gestão de Sustentabilidade do Centro. Membro do Comitê de Meio Ambiente do Cigré (C3) e representante brasileira no Working Group C3.20.

## (6) LUCIANA ROCHA LEAL DA PAZ

Luciana Rocha Leal da Paz é Doutora em Planejamento Ambiental pelo Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ em 2006, Mestre em Sociologia pela Universidade de Brasília em 1997, Bacharel em Geografia pela Universidade de Brasília em 1991. É Pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) desde 2005. Tem experiência na área de Planejamento Energético e Ambiental, e atua principalmente nos temas ligados à sustentabilidade empresarial, questão indígena, mudanças climáticas e inserção da variável ambiental no planejamento do setor elétrico.

## (7) JULIANO LUCAS SOUZA DE ABREU

Juliano Lucas Souza de Abreu é pesquisador na área de recursos hídricos e meio ambiente, com foco em mudanças climáticas e emissões de gases de efeito estufa associados às atividades do setor elétrico. Atua, em colaboração com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), em projetos de pesquisa e desenvolvimento de metodologias, modelos e ferramentas computacionais que apoiam o diagnóstico, a minimização, a mitigação e/ou o monitoramento de impactos ambientais de empreendimentos do setor elétrico. É graduado em engenharia ambiental pela UFSCar, em oceanografia pela UERJ e mestre em recursos hídricos e meio ambiente pelo PEC/COPPE/UFRJ.

