

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
PRÁTICAS EM DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

DISSERTAÇÃO

**A Pegada de Carbono na Produção de Energia Hidráulica: Uma
Abordagem Metodológica Prospectiva para as Emissões de
Carbono**

Patrícia Macedo Guimarães

2017



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**A PEGADA DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA
HIDRÁULICA: UMA ABORDAGEM METODOLÓGICA
PROSPECTIVA PARA AS EMISSÕES DE CARBONO**

PATRÍCIA MACEDO GUIMARÃES

Sob orientação do Professor Doutor

Ednaldo Oliveira dos Santos

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Seropédica, RJ
Novembro de 2017

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M963p Macedo Guimarães, Patrícia, 1983-
A PEGADA DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA
HIDRÁULICA: UMA ABORDAGEM METODOLÓGICA PROSPECTIVA
PARA AS EMISSÕES DE CARBONO / Patrícia Macedo
Guimarães. - 2017.
49 f.: il.

Orientador: Ednaldo Oliveira dos Santos.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2017.

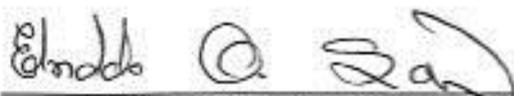
1. Análise do Ciclo de Vida. 2. Pegada de Carbono.
3. Hidrelétrica. 4. Emissões líquidas de Carbono. I.
Oliveira dos Santos, Ednaldo, 1969-, orient. II
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. PÓS
GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL**

PATRÍCIA MACEDO GUIMARÃES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável da UFRRJ.

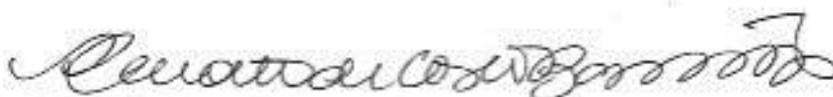
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/11/2017



**Ednaldo Oliveira dos Santos. Prof. Dr. UFRRJ
(Orientador)**



**Amaro Olímpio Pereira Júnior. Prof. Dr. UFRJ
(Membro Externo)**



**Renata da Costa Barreto. Prof.ª Dr.ª – UFRJ
(Membro Externo)**

DEDICATÓRIA

O presente trabalho é dedicado a Lucas L. Marques, pela companhia, pelo apoio e pela inspiração profissional e pessoal.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Rural do Rio de Janeiro por me proporcionar a oportunidade de acesso às discussões riquíssimas e informações que contribuíram para meu aperfeiçoamento profissional;

Agradeço ao meu orientador, Ednaldo Oliveira dos Santos, pela compreensão, dedicação, ensinamentos e auxílio durante a elaboração deste trabalho;

Agradeço aos meus filhos, Letícia e Miguel, pelo carinho e olhares de admiração que me incentivam a buscar mais conhecimento;

Agradeço aos meus pais, em especial à minha mãe, pelo amor e ajuda incondicional.

RESUMO

GUIMARÃES, Patrícia Macedo. **A Pegada de Carbono na Produção de Energia Hidráulica: Uma Abordagem Prospectiva para as Emissões de Carbono**. 2017. 47p. Dissertação (Mestrado em Práticas em Desenvolvimento Sustentável). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

A abordagem sobre a quantificação das emissões de Carbono, por meio da análise dos procedimentos para gerar relatórios de pegada de carbono na produção de energia hidrelétrica, viabiliza e colabora com a tomada de decisão estratégica para o setor elétrico brasileiro. Considerando os critérios norteadores da Lei 12.187/09, que instituiu a Política Nacional de Mudanças Climáticas, especialmente a previsão do Art. 3º, IV, que prevê que o “*desenvolvimento sustentável é condição para enfrentar as alterações climáticas e conciliar o atendimento às necessidades comuns e particulares das populações e comunidades que vivem em território nacional*”, bem como o recente acordo celebrado em Paris na COP21, no qual o Brasil se comprometeu a tomar medidas consistentes no combate ao aumento da temperatura global, a análise de emissões de carbono liberadas para a atmosfera busca atender aos anseios desse desenvolvimento sustentável e desse objetivo global de controle de emissões, adequando a produção de energia à proposta de enfrentamento das causas que contribuem para alterações climáticas. O maior benefício deste estudo será para fins de tomada de decisões referentes aos investimentos no setor elétrico brasileiro com foco na gestão das emissões de GEE. O método a ser utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho contou com (1) revisão bibliográfica de trabalhos relacionados ao tema; (2) análise das metodologias ISO 14067 e GHG PROTOCOL-FGV para emissão os relatórios de pegada de carbono; (3) análise crítica da metodologia do IPCC, para fins de quantificação de emissões e formação dos bancos de dados (inventários de emissões) para os relatórios de pegada de carbono; e (4) análise da experiência nacional na execução do levantamento de dados sobre emissões em hidrelétricas com reservatórios através do projeto BALCAR. Os resultados demonstraram que a Pegada de Carbono pode ser usada como instrumento de planejamento para atendimento aos objetivos legais do Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Portanto, espera-se que este trabalho tenha contribuído com o avanço do conhecimento sobre as emissões na produção de energia hidrelétrica no Brasil, e os impactos dessas emissões, de maneira colaborar com a eficiência na utilização de recursos naturais na produção de energia elétrica.

Palavras-chave: Análise do Ciclo de Vida, Pegada de Carbono, Hidrelétrica, Emissões líquidas de Carbono.

ABSTRACT

GUIMARÃES, Patrícia Macedo. **Carbon Footprint in Hydraulic Energy Production: An Approach Prospective to Carbon Emissions**. 2017. 47p. Dissertation (Master in Practices in Sustainable Development). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

The quantification of carbon emissions, through the analysis of carbon footprint reports in the hydroelectric power production, enables and contributes to Brazilian electricity sector in regard to strategic decision. Considering article 30, IV of Law 12,187/09, National Policy on Climate Change, which states that "*sustainable development is a condition for tackling climate change and reconciling the common and particular needs of the populations and communities living on national territory*", as well as the recent agreement signed in Paris at COP21 through of which Brazil has committed itself to taking consistent measures to combat increasing of global temperature, the analysis of carbon emissions released into the atmosphere seeks to meet the aspirations of this sustainable development and global objective, adjusting the energy production to such proposal related to climate change. The greatest benefit in expanding knowledge will be for decision-making purposes related to investments in the Brazilian electricity sector. The method used for the development of the present work had (1) bibliographical review of papers related to the topic, (2) analysis of the ISO 14067 and GHG PROTOCOL-FGV methodologies for carbon footprint reports; (3) critical analysis of the IPCC methodology for emissions quantification and formation of the databases (emissions inventories) for the carbon footprint reports; and (4) analysis of the national experience in the execution of data collection on hydroelectric reservoir emissions through the BALCAR project. The results showed that Carbon Footprint could be used as a planning instrument to meet the legal objectives of the National Plan for Adaptation to Climate Change. Therefore, it is expected that this work may contribute to the knowledge about emissions related to hydroelectric energy production in Brazil and impacts of these emissions, in order to collaborate with the efficiency in use of natural resources regarding production of electric energy.

Key words: Life Cycle Analysis, Carbon Footprint, Hydropower, Net Carbon Emissions.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Estrutura Geral do Balanço Energético Brasileiro. Fonte: BRASIL (2017) 5
- Figura 2:** Participação das energias renováveis na matriz energética brasileira em comparação com o mundo. Fonte: Adaptado de BRASIL (2017) 6
- Figura 3:** Fluxo de energia elétrica no Brasil. Fonte: BRASIL (2017) 7
- Figura 4:** Abordagem baseada em Cálculos. Fonte: CE (2012) apud GVCES (2015, Anexo 1) 24
- Figura 5:** Princípio da Abordagem de Balanço de Massa. Fonte: CE (2012) apud GVCES (2015, Anexo 1) 24
- Figura 6:** Esquema geral para análise de dados conforme a metodologia da UNESCO/IHA. Fonte: Adaptado de UNESCO/IHA (2010b) 29
- Figura 7:** Comparação de Intensidades de Emissões Líquidas de GEE dos empreendimentos hidrelétricos no cenário Floresta Remoção com termelétricas a carvão ou gás natural. Fonte: Adaptado de BRASIL (2014) 34
- Figura 8:** Comparação de Intensidades de Emissões Líquidas de GEE dos empreendimentos hidrelétricos no cenário Floresta Neutra com termelétricas a carvão ou gás natural. Fonte: Adaptado de BRASIL (2014) 35
- Figura 9:** Comparação de Intensidades de Emissões Líquidas de GEE dos empreendimentos hidrelétricos no cenário Floresta Emissão com termelétricas a carvão ou gás natural. Fonte: Adaptado de BRASIL (2014) 36

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Balanço de emissões líquidas de carbono de empreendimentos hidrelétricos (UHE) brasileiros usando os cenários Floresta Remoção (a), Neutra (b) e Emissão (c) 33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	2
2 OBJETIVOS	3
2.1 Geral	3
2.2 Específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Preâmbulo sobre sustentabilidade e gestão dos recursos naturais	4
3.2 Matriz energética brasileira	4
3.2.1 Emissões de carbono da matriz energética brasileira	5
3.3 Matriz elétrica brasileira	6
3.3.1 Breve panorama brasileiro de produção de energia hidrelétrica	7
3.3.2 Emissões de carbono da matriz elétrica brasileira	8
3.3.2.1 Processos relacionados às emissões de carbono em reservatórios de hidrelétricas	8
3.4 O estado da arte da quantificação de emissões de carbono de hidrelétricas com reservatórios no Brasil	9
3.5 Compromissos de redução das emissões e o setor elétrico brasileiro	11
4 METODOLOGIA	12
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
5.1 A ferramenta analítica da pegada de carbono	13
5.2 A similaridade entre a avaliação de ciclo de vida em termos de emissões e a pegada de carbono, bem como suas contribuições para a tomada de decisão	14
5.3 As principais metodologias utilizadas para a estimativa de emissões de carbono	15
5.4 A pegada de carbono e relatório de emissões de carbono da energia hidráulica	17
5.4.1 Metodologia GHG Protocol/FGV	18
5.4.2 Breve análise sobre a metodologia ISO 14.067:2013	21
5.5 Quantificação dos fluxos de carbono – emissão e remoção	23
5.5.1 Abordagens baseadas em cálculos	23
5.5.2 Abordagens baseadas em balanço de massa	24
5.5.3 Abordagens baseadas em medição direta	25
5.5.4 A abordagem do IPCC para quantificação de gases de reservatórios	25
5.5.5 O projeto P&D brasileiro de quantificação de emissões de usinas hidrelétricas	31
5.6 Exigências legais referentes aos relatórios dos fluxos de GEE em hidrelétricas com reservatórios	38
6 CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

As emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) são as protagonistas dos debates voltados para as mudanças climáticas, seja em âmbito científico como também por meio de abordagens políticas.

As investidas mundiais no combate ao aquecimento global podem ser exemplificadas por propostas como o Acordo de Paris, que prevê que os países desenvolvidos investirão em medidas de combate à mudança do clima e adaptação nos países considerados em desenvolvimento. Nesse contexto, o Brasil, em que pese não ser considerado um país desenvolvido, apresentou sua Contribuição Nacional Determinada (NDC) com metas ambiciosas até o ano de 2030 (BRASIL, 2017) e criou um Plano Nacional de Adaptação às Mudanças do Clima.

O mundo procura reduzir ou estagnar as emissões de GEE, na busca de reduzir o potencial de aquecimento global e/ou as mudanças climáticas. E foi nesse contexto mundial que o Brasil assumiu legalmente, e voluntariamente, compromissos de redução de suas emissões de GEE, através da Política Nacional de Mudanças Climáticas e, mais recentemente, do Plano Nacional de Adaptação às Mudanças do Clima.

Ocorre que a redução das emissões de GEE, em sua maioria, estão diretamente ligadas às restrições de produção e a mudança de padrão de consumo, o que inevitavelmente impacta a economia de um país, elevando a importância de haver um posicionamento estratégico no que tange às emissões nacionais e um plano de ação, de forma a propiciar o desenvolvimento de políticas públicas efetivas (ALBUQUERQUE, 2012).

Portanto, há a necessidade de gerir eficientemente as emissões nacionais de GEE e parece essencial em um país com majoritária produção de energia hidráulica ampliar o conhecimento no assunto, especialmente quanto às emissões líquidas¹ de carbono no ciclo produtivo de hidrelétricas. A utilização da ferramenta de Pegada de Carbono, que relata os fluxos de carbono no ciclo de vida de determinado produto, mostra-se, então, com benefícios inestimáveis para a avaliação de investimentos no longo prazo.

A Pegada de Carbono trata-se de uma ferramenta analítica para avaliar o potencial de contribuição de determinado produto para as mudanças climáticas, com a quantificação de todas as emissões de GEE no ciclo de vida desse produto (ISO14.067:2013). Sua utilização não é imposta por Lei, apesar da potencial capacidade de avaliar os impactos ambientais de forma mais integrada, bem como da crescente exigência de apresentação de relatórios de emissões de carbono durante determinados processos produtivos e para a competitividade empresarial global.

Ferramentas como a Pegada de Carbono, ou mesmo a Avaliação do Ciclo de Vida, que consideram análise de todas as emissões no ciclo de vida do produto ainda estão em fase incipiente de utilização no Brasil. Além disso, há uma enorme necessidade de adaptar ou criar novas metodologias com a finalidade de levar em consideração na base de dados de emissões (inventário) aspectos nacionais peculiares, tais como: vegetação, solo, temperatura da água e do ar, umidade do ar, vento, entre outros.

Portanto, uma análise de inventário de dados e sua interpretação considerando todo o ciclo de vida do produto - energia hidráulica, em vista de sua enorme representatividade no Brasil para o setor elétrico - 65,2% em 2014 (BRASIL, 2015), propiciará maior clareza para eventual tomada de decisões relevantes, especialmente no tocante aos investimentos em energias renováveis que possam ser mais sustentáveis e eficientes no uso de recursos naturais.

¹ Emissões líquidas são aquelas em que são descontadas as emissões antes da implantação de um empreendimento hidrelétrico (pré-existent).

1.1 Justificativa

No Brasil a hidroeletricidade é um diferencial importante da matriz energética renovável, mas existe razoável incerteza na quantificação de suas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo necessário o aumento do conhecimento sobre os processos que norteiam os fluxos de gases em ambientes aquáticos, como os reservatórios.

O Relatório Especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC) sobre Fontes Renováveis de Energia e a Mitigação da Mudança Climática (IPCC, 2012) ressaltou em suas conclusões sobre as emissões de hidrelétricas: "*atualmente não há consenso sobre se os reservatórios são emissores líquidos ou sumidouros líquidos*". Os resultados deste Relatório tiveram que se encaixar em uma análise de ciclo de vida, cujos estudos usados estavam sem padronização, levando a incompletas e inconclusivas análises de ciclo de vida.

Assim, em estudos comparativos desta natureza devem ser levadas em consideração as emissões de carbono da produção de energia avaliando tais emissões através de uma metodologia padronizada, em todo o ciclo de vida (mudanças de uso da terra, construção da barragem, produção de energia, etc.) para que os dados sejam representativos e mais precisos, o que possibilitará também estudos comparativos.

Esse anseio por uma base de dados sólida e a ampliação do conhecimento sobre emissões de GEE é inclusive um dos objetivos do Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima, um dos instrumentos que subsidiarão a redução das emissões compromissadas pelo Brasil no Acordo de Paris, celebrado em dezembro de 2015 (UNFCCC, 2015).

Nesse contexto, vem crescendo o interesse em se usar a ferramenta Pegada de Carbono para determinar os processos e as emissões de carbono ao longo do ciclo de vida da energia hidráulica, já que é fundamental que se amplie o conhecimento sobre esta temática e sejam elaboradas cada vez mais pesquisas que considerem os fluxos de GEE de fontes energéticas em todo o ciclo de vida.

Portanto, o presente estudo versará no pilar das seguintes questões:

- ✓ É possível usar a Pegada de Carbono para melhorar a quantificação das emissões de carbono na produção de energia hidráulica?
- ✓ Por que a Pegada de Carbono não está sendo usada como instrumento para quantificação do balanço de carbono na produção de energia hidráulica?
- ✓ A Pegada de carbono não deveria ser usada como requisito para a tomada de decisões referentes ao desenvolvimento do potencial hidrelétrico, uma vez que o Brasil se comprometeu internacionalmente a reduzir suas emissões de GEE em 43% até o ano de 2030?

Conseqüentemente a hipótese desta dissertação é: A Pegada de Carbono deve ser usada como instrumento de planejamento para atendimento dos objetivos legais do Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar a Pegada de Carbono como instrumento para tomada de decisões referentes aos investimentos no setor elétrico brasileiro através da quantificação das emissões de carbono da energia hidráulica.

2.2 Específicos

Coletar, tratar e compilar dados e informações sobre a produção de energia hidráulica brasileira e suas emissões em termos de carbono.

Identificar os processos existentes ao longo do ciclo de vida para a produção de energia hidráulica no Brasil.

Avaliar a aplicabilidade da técnica da Pegada de Carbono para quantificar as emissões de carbono na produção de energia hidráulica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Preâmbulo sobre Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Naturais

Sustentabilidade é um termo dinâmico, seus pilares e conceitos avançam conforme ocorrem transformações culturais. Já desenvolvimento sustentável é, por sua vez, um conceito que deve se transformar e se reinventar a cada avanço econômico, social e/ou tecnológico, e, portanto, tende a ser altamente mutante.

Elkington (2012) afirma que existem centenas de definições de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, porém, recentemente vem sendo utilizada a definição do *World Commission on Environmental and Development*, a qual preconiza que "*o desenvolvimento é sustentável onde ele atende às necessidades da população atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras no atendimento de suas próprias necessidades*".

Note, nesse contexto, que a produção de energia está intimamente ligada às necessidades da população atual, que tendem a crescer. Esse modelo de crescimento econômico, fundamentado no aumento do consumo e produção, leva, necessariamente, ao conflito intergeracional decorrente da escassez de recursos naturais, o que impõe a necessidade de se repensar os modelos de produção de energia para fins do desenvolvimento sustentável.

Nesse escopo, o aquecimento global decorrente de emissões de GEE, tendo as mudanças climáticas como consequência, vem sendo avaliado como um problema a ser enfrentado pela humanidade atual em prol das gerações futuras, cuja redução de emissões no setor energético, portanto, se tornou essencial. Em vista dessa necessidade de se gerir os recursos existentes de forma menos agressiva ambientalmente, é que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), e por sua vez, em uma perspectiva mais pontual para as emissões de GEE, a Pegada de Carbono, ganham notoriedade, pois propõem analisar o produto desde a extração de insumos até sua disposição final. De acordo com Elkington (2012) a avaliação do ciclo de vida pode focar a busca de contribuições de um material, processo, produto ou desenvolvimento. Tais contribuições sem dúvida são instrumentos necessários e elementares ao gerenciamento de emissões, conforme o Brasil necessita fazer.

Para fins do presente trabalho a análise das emissões de GEE ficará restrita a hidrelétricas até o momento de operação do empreendimento, ficando essa análise delimitada ao contexto de mudanças climáticas.

3.2 Matriz Energética Brasileira

A matriz energética brasileira engloba todas as formas de energia produzida e consumida no Brasil. Por sua vez, o Balanço Energético Nacional é elaborado considerando uma metodologia que expressa o balanço das diversas etapas do processo energético (BRASIL, 2017), conforme Figura 1.

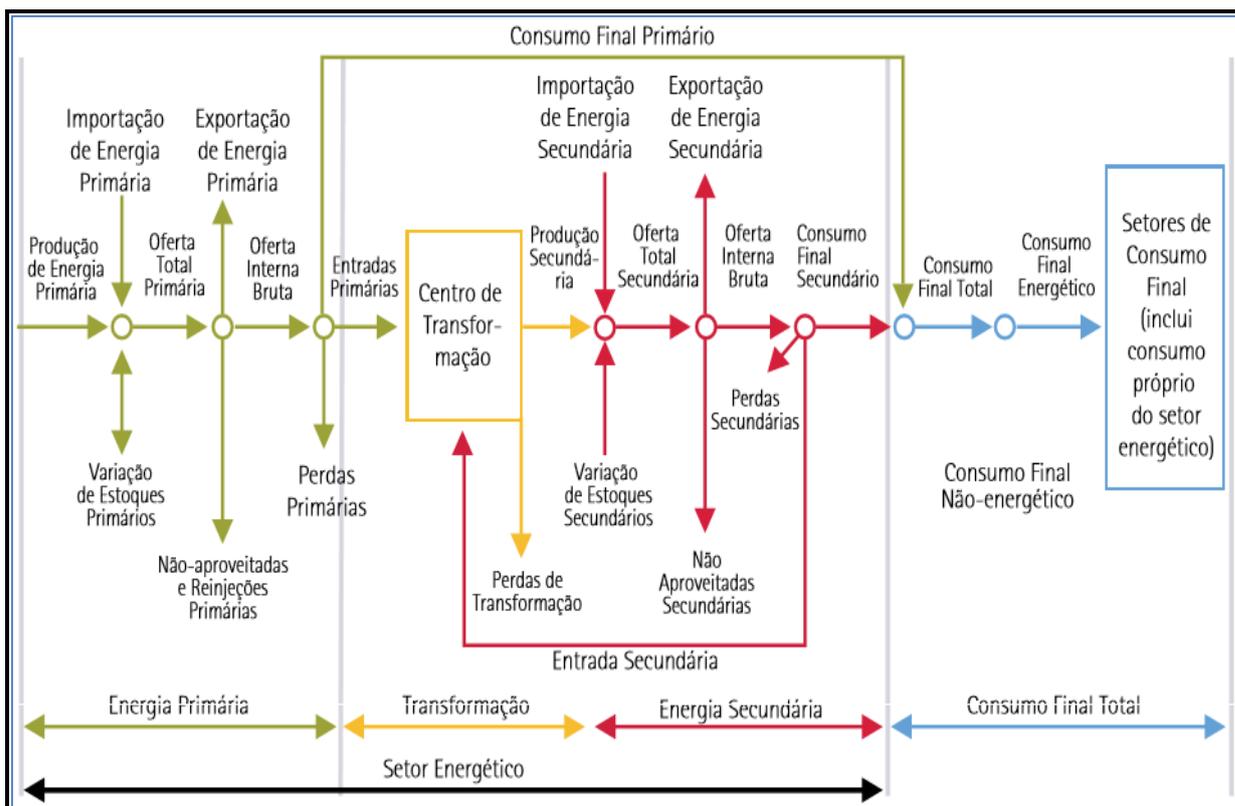


Figura 1: Estrutura Geral do Balanço Energético Brasileiro. Fonte: BRASIL (2017).

3.2.1 Emissões de carbono da matriz energética brasileira

De acordo com o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN (BRASIL, 2016), ano-base 2015, que apresentou resumidamente detalhes sobre a contabilização da oferta, transformação e consumo final de produtos energéticos no Brasil, no ano de 2015 o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 462,3 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO₂eq), contra 485,1 Mt CO₂eq em 2014. Ao se analisar os dados nota-se uma redução das emissões de CO₂.

Em sintonia, o relatório de 2017 (BRASIL, 2017) apresentou que a participação das energias renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, conforme pode ser visualizado através da figura a seguir.

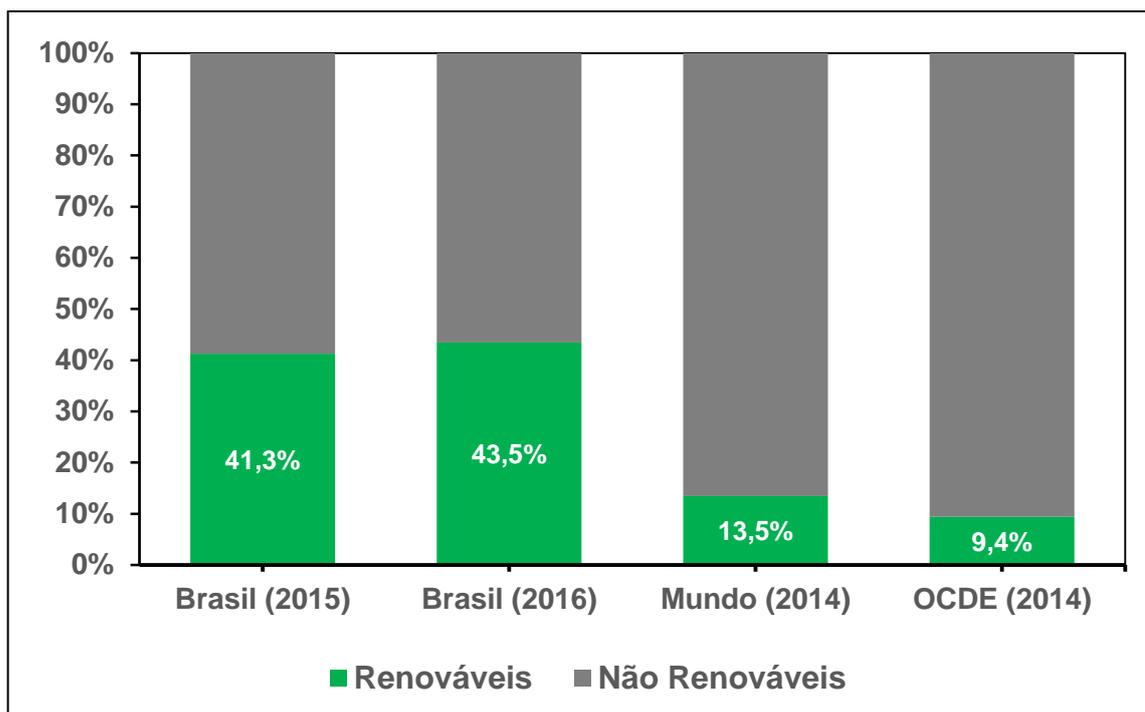


Figura 2: Participação das energias renováveis na matriz energética brasileira em comparação com o mundo. Fonte: Adaptado de BRASIL (2017).

O BEN, em 2017, destacou que o setor elétrico brasileiro emitiu, em média, 101,3 kg CO₂ para produzir 1 MWh, o que se considera um índice muito baixo quando comparado com países da União Europeia, EUA e China.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2016) a expressiva participação da energia hidráulica e o uso representativo da biomassa na matriz energética brasileira proporcionam indicadores de emissões de CO₂ bem menores do que a média mundial e dos países desenvolvidos.

No entanto, é conveniente ressaltar que apesar do Brasil apresentar índices menores do que a média mundial e possuir em sua matriz a predominância de energia renovável, os valores de emissões advindos de fontes hidráulicas não são estáveis e podem estar subestimados em relatórios de emissões nacionais. Por se tratar de um ambiente natural, as características biológicas da região afetada por um empreendimento hidrelétrico implicam em uma interação do empreendimento com o ambiente de forma singular. É por tal razão que a utilização de dados internacionais, como do IPCC, projetados para o Brasil, devem ser avaliados com parcimônia, preferindo-se a aferição que considera as singularidades locais e propiciam a quantificação líquida de emissões.

3.3 Matriz Elétrica Brasileira

A matriz elétrica está dentro do escopo da matriz energética, possuindo, no entanto, um escopo voltado para a capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil, com a predominância de fontes renováveis (Figura 3).

Visto a enorme representatividade da produção hidráulica, descreveremos a seguir o seu panorama de produção.

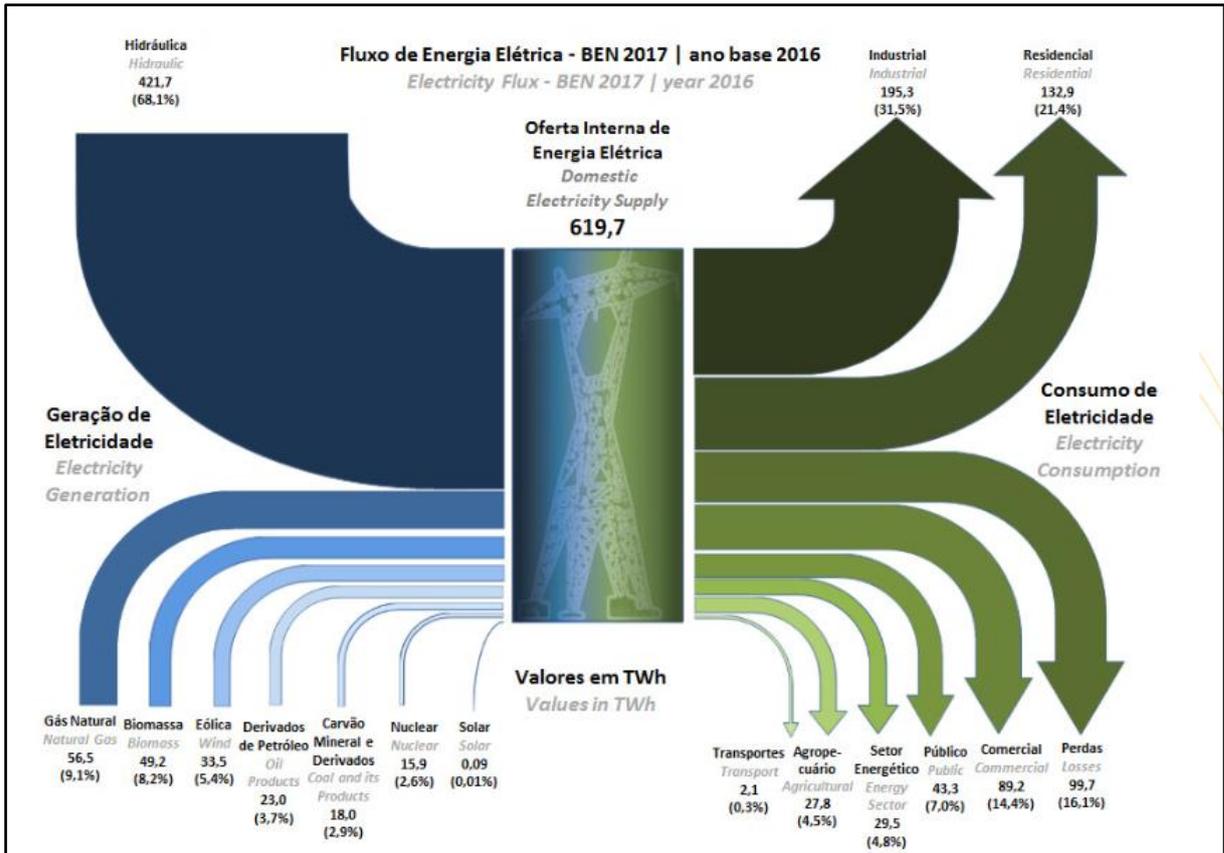


Figura 3: Fluxo de energia elétrica no Brasil. Fonte: BRASIL (2017).

3.3.1 Breve panorama brasileiro de produção de energia hidrelétrica

A produção de energia elétrica pela fonte hidráulica tradicionalmente predomina no Brasil e continua a predominar, apesar dos incentivos recentes para o desenvolvimento e instalação de demais fontes renováveis de energia.

De acordo com o ex-presidente da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a participação da hidroeletricidade na capacidade instalada total do parque gerador reduziu de quase 80% em 2005 para cerca de 67% em 2014 e, em termos de geração, sua participação na matriz elétrica reduziu de 83% para 63% no mesmo período (TOLMASQUIM, 2016). Todavia, mesmo com essa considerável redução, continua ainda sendo a fonte de produção de energia predominante.

Nota-se que nos últimos anos houve um impulso em investimentos e incentivos à instalação de novas formas de produção renovável de energia e, conseqüentemente, a esse fator se atribui em parte à redução da participação da fonte hidráulica no parque gerador nacional. É preciso ressaltar que aliado aos investimentos em energia renovável, o Brasil enfrentou nos últimos anos uma séria crise hídrica. Isso contribuiu para a redução da capacidade produtiva das fontes hidráulicas.

No entanto, quando se compara a segurança de suprimento de fontes renováveis, é preciso considerar que fontes como eólica e fotovoltaica encontram oscilações positivas e negativas. A hidroeletricidade, por sua vez, pode minimizar esses efeitos negativos de oscilação e mais, se estabelecida uma ação integrada entre as fontes renováveis de produção de energia (alternativas e hidrelétricas), é possível reduzir a necessidade de acionar fontes térmicas, que dependem de combustíveis fósseis e são grandes emissoras de GEE (TOLMASQUIM, 2016).

Na perspectiva socioambiental, atualmente observa-se que hidrelétricas tendem a ter pouca receptividade, especialmente diante dos impactos associados à construção de grandes barragens (WEC, 2015 *apud* TOLMASQUIM, 2016), mas, por outro lado, trata-se de uma forma de produção de energia considerada madura e confiável que, *no atual contexto de maior preocupação com as emissões de gases de efeito estufa, apresenta a vantagem adicional de ser uma fonte renovável de geração* (TOLMASQUIM, 2016).

Portanto, é em razão de todos esses argumentos que regulamentar a elaboração de relatórios de Pegada de Carbono para todas as fontes de produção de energia, considerando os impactos no longo prazo, pode contribuir significativamente para a tomada de decisões sobre o tipo de investimento a ser estimulado no Brasil.

3.3.2 Emissões de carbono da matriz elétrica brasileira

3.3.2.1 Processos relacionados às emissões de carbono em reservatórios de hidrelétricas

Para um melhor entendimento acerca das emissões de carbono advindas das hidrelétricas é necessário inicialmente conhecer todos os processos envolvidos.

Do ponto de vista ecológico, a decomposição da biomassa inundada representa a principal fonte de emissão de gases nos primeiros anos de operação de usinas hidrelétricas (GALY-LACAUX *et al.*, 1999; TREMBLAY *et al.*, 2004; ABRIL *et al.*, 2005). Note que é um fenômeno complexo analisar os gases biogênicos gerados pela decomposição da biomassa em razão da quantidade de variáveis interdependentes que influem nas emissões de GEE dos reservatórios (ROGÉRIO *et al.*, 2013)

O processo de enchimento destes sistemas está associado às altas taxas de atividade bacteriana e produção de gases de efeito estufa, porque a atividade bacteriana decompõe a fração orgânica do carbono, convertendo-a para formas inorgânicas e dissolvidas, como dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) (GALY-LACAUX *et al.*, 1999), onde nos primeiros dez anos grande parte da biomassa inundada é decomposta (ROLAND *et al.*, 2010).

Posteriormente a essa "lavagem" do carbono orgânico inundado, o metabolismo dos reservatórios passa a ser dirigido por fontes alóctones de carbono (originado na bacia e carregado pelos rios e por águas superficiais periféricas - "runoff") e fixação pela produção primária.

Estudos mostram que níveis baixos de oxigênio nas camadas profundas próximas ao sedimento favorece a geração de metano (UTSUMI *et al.*, 1998a; LIMA, 2005). Parte do estoque de metano dissolvido na água pode ainda ser oxidado na coluna da água e emitido como CO₂ (GUERIN *et al.*, 2007; TREMBLAY *et al.*, 2004; UTSUMI *et al.*, 1998b). No caso de hidrelétricas localizadas em zonas tropicais, estudos prévios têm mostrado que as concentrações de CH₄ aumentam significativamente em grandes profundidades. (GALY-LACAUX *et al.* 1999 *apud* ROGÉRIO *et al.*, 2013). Além disso a temperatura da água é bastante influenciadora no comportamento dos gases, pois quanto mais baixa a temperatura da água, maior é a solubilidade dos gases e quanto mais aumenta a temperatura, maior será o metabolismo do sistema, de acordo com Esteves (2011) *apud* Rogério *et al.* (2013).

Ressalte-se, ainda, que a superfície dos reservatórios é responsável pelas principais trocas gasosas com a atmosfera (ABRIL *et al.*, 2005), porém, emissões significativas podem ainda acontecer após a passagem da água pelas turbinas, processo denominado de "degassing" (ROEHM & TREMBLAY, 2006; KEMENES *et al.*, 2007).

Os gases produzidos nos reservatórios também podem ser estocados permanentemente no sedimento destes sistemas (SIKAR *et al.*, 2009). Estimativas sugerem que os sedimentos dos reservatórios estocam mais carbono do que lagos naturais (COLE *et al.*, 2007; DOWNING *et al.*, 2008).

Além dos processos mencionados acima, existe também a influência de outros fatores e parâmetros ambientais que causam efeitos diretos na produção e emissão de GEE em reservatórios hidrelétricos (COLE & CARACO, 1998; KEMENES, 2006; ESTEVES, 2011; ROGERIO *et al.*, 2013).

Desta maneira, estabelecer a relação entre os fluxos difusivos de CH₄ e CO₂ com as variáveis ambientais representa uma grande contribuição para entender o processo envolvido nas emissões de reservatórios (ROGÉRIO *et al.*, 2013)

3.4 O Estado da Arte da Quantificação de Emissões de Carbono de Hidrelétricas com Reservatórios no Brasil

A produção de energia por meio hidráulico representa uma tecnologia confiável, eficiente, com baixo custo de operação e manutenção, além de flexibilidade para se ajustar às mudanças de carga (BRASIL, 2014).

Divididas em três categorias funcionais, de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2012), as hidrelétricas classificam-se como: (i) usina a fio d'água; (ii) usinas reversíveis (UHR) e (iii) usinas com reservatório de acumulação (TOLMASQUIM, 2016).

As usinas a fio d'água produzem energia de acordo com a vazão que chega aos seus reservatórios e podem apresentar pequena capacidade de armazenamento. As usinas reversíveis (UHR) armazenam energia potencial gravitacional na forma de água em um reservatório elevado, que é bombeada de um reservatório inferior - é preciso destacar que as UHRs são consumidoras líquidas de energia em razão do seu ciclo de operação. Já as usinas com reservatório de acumulação caracterizam-se pela sua capacidade de armazenar grandes quantidades de água, mitigando a variabilidade hidrológica sazonal (TOLMASQUIM, 2016).

Ocorre que em razão dos impactos socioambientais das hidrelétricas, em especial, das usinas com reservatório de acumulação, existe uma considerável resistência à instalação de empreendimentos dessa modalidade e há um crescente movimento alertando para possíveis subestimações de emissões em sua produção de energia. Por outro lado, essa mesma resistência não avalia o ciclo de vida de demais fontes de produção de energia de maneira a comparar a eficiência produtiva com os impactos associados.

Ao longo das décadas de 1990 e 2000 foram apresentados diversos estudos mostrando que medições de emissões de GEE feitas em reservatórios de hidrelétricas implantados (denominadas emissões brutas) indicaram que o papel destas no total das emissões globais antropogênicas de GEE não pode ser desprezível (RUDD *et al.*, 1993; KELLY & STALLARD., 1994; ST LOUIS *et al.*, 2000; ROSA *et al.*, 2004; ABRIL *et al.*, 2005, DELMAS *et al.*, 2005; GILES, 2006; SANTOS, 2006; SANTOS *et al.*, 2006; FURNAS, 2008; SANTOS *et al.*, 2008; TREMBLAY *et al.*, 2010a, 2010b; TREMBLAY, 2011; TEODORU *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2013). A Comissão Mundial de Barragens, por sua vez, ainda ressaltou no final da década de 1990 a possível correlação entre o papel das barragens e o aumento do efeito estufa, sendo que um relatório preparado para a Comissão por Rosa & Santos (2000) alertou para as incertezas relativas ao fenômeno (BRASIL, 2014).

Todavia, tais considerações não avaliaram as emissões existentes pré-enchimento, condições climáticas existentes, bem como a possibilidade de haver captação de carbono da atmosfera por alguns reservatórios, especialmente na fase de sedimentação. Ademais, as técnicas de construção de um empreendimento já evoluíram para reduzir os impactos ambientais e sociais associados às Usinas com reservatórios.

Para tentar responder às questões já mencionadas, o governo brasileiro, através do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL/ELETROBRAS/MME), realizou o projeto denominado “Monitoramento de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios de Usinas Hidrelétricas - PROJETO BALCAR” (BRASIL, 2014), com objetivo de estudar o balanço de emissões no Brasil de oito aproveitamentos hidrelétricos em operação (Balbina, Tucuruí, Xingó, Três Marias, Serra da Mesa, Funil, Itaipu e Segredo) e de três em construção (Belo Monte, Santo Antônio e Batalha). Todos distribuídos ao longo dos diferentes biomas e latitudes no território brasileiro. As conclusões mostram que emissões de hidrelétricas, em sua maioria, continuam menores do que termoelétricas, ou seja, ambientalmente competitivas do ponto de vista da produção de energia e emissões de GEE.

Assim, dentre as principais conclusões do Projeto acima mencionado está a de que as emissões pós-enchimento, por unidade de energia produzida, se mostraram inferiores às emissões por termoelétricas, com exceção para o reservatório de Balbina - aproveitamento onde se associam uma extensa área inundada e capacidade de geração não significativa². Ademais, concluiu-se que as intensidades de GEE líquidas calculadas, assim como as pós-enchimento, também se mostraram consideravelmente inferiores às emissões por termoelétricas e do mesmo modo a exceção ocorreu para o reservatório de Balbina, que devido sua extensa área inundada e baixa capacidade de geração obteve elevados valores para a intensidade de GEE.

Além disso, o Projeto citado acima demonstrou que as hidrelétricas com reservatórios de acumulação podem representar um investimento importante em um contexto que impõe o aumento da produção de energia elétrica por fontes renováveis e se impõe segurança no abastecimento dessa energia gerada. Todavia, as emissões de GEE não devem ser ignoradas e é preciso aprofundar o conhecimento sobre os fluxos de gases nos reservatórios.

O panorama atual sobre emissões líquidas é impreciso e, de fato, existe razoável incerteza sobre a quantificação das emissões de GEE de reservatórios artificiais, que por se tratarem de ambientes naturais são afetados por fatores como: variabilidade climática anual, emissões pré-enchimento e captação de carbono - estudos recentes têm mostrado que reservatórios podem atuar como sumidouros de carbono (SIKAR *et al.*, 2009; CHANUDET *et al.*, 2011; OMETTO *et al.*, 2011; ROGERIO *et al.*, 2013; BRASIL, 2014) captando CO₂ na fase de sedimentação.

Essa incerteza é o que justifica o relatório de emissões 2016 elaborado pela Eletrobrás não ter considerado as emissões de reservatórios, ressaltando *não haver, até o momento, consenso científico internacional sobre metodologia que permita estimar essas emissões e calcular o balanço de emissões (ou emissões líquidas) de corpos hídricos, como os reservatórios artificiais.*

A tamanha incerteza metodológica levou o próprio Programa Brasileiro GHG Protocol, utilizado como metodologia para gerar relatórios de contabilização de carbono, a disponibilizar somente em março de 2017 uma nota técnica para orientar a contabilização de emissões para mudança do uso do solo, categoria em que se inserem as hidrelétricas com reservatórios de acumulação.

² O empreendimento de Balbina não deve ser utilizado como parâmetro para fins de impactos associados à uma hidrelétrica em razão de diversos erros técnicos e de ideologia adotadas na época de sua concepção e construção.

Desta maneira, é notória a situação ainda turva quanto à quantificação de carbono de reservatórios de hidrelétricas, e, portanto, uma estruturação de estudos e metodologia mostra-se indispensável para se discutir investimentos no setor, e conseqüentemente gerir as emissões nacionais, avaliando-se se os objetivos nacionais comprometidos com a redução de GEE estão e serão respeitados.

Sendo assim, o uso da ferramenta analítica Pegada de Carbono pode ser de suma importância para melhorar a contabilização das emissões de GEE e, conseqüentemente, o balanço do carbono no setor da hidroeletricidade brasileira.

3.5 Compromissos de Redução das Emissões e o Setor Elétrico Brasileiro

Ao analisar a Lei 12.187/09, que instituiu no Brasil a Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC), vê-se que dentre seus objetivos está a redução das emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) em relação às suas diferentes fontes, o que é enfatizado pelo Art. 12 da referida Lei prevendo o compromisso nacional voluntário de redução de suas emissões projetadas até 2020 entre 36,1% e 38,9% (BRASIL, 2009)³.

Ainda em termos de planejamento e no contexto legal, em dezembro de 2010, o Decreto 7.390/10 regulamentou alguns artigos da Lei 12.187/09 e dispôs que para alcançar esse compromisso nacional voluntário, de que trata o Art. 12, serão implementadas ações que almejem reduzir entre 1.168 milhões e 1.259 milhões de tCO₂eq do total de emissões estimadas, e tais ações englobam a expansão da oferta de energia hidrelétrica, de fontes alternativas renováveis, notadamente centrais eólicas, pequenas centrais hidrelétricas (PCH), bioeletricidade, biocombustíveis, e incremento da eficiência energética.

Não fosse apenas a previsão legal de 2010 para redução de emissões, ao final do ano de 2015, com a celebração do Acordo de Paris, durante a reunião da COP21, o Brasil ainda se comprometeu a atender as metas previstas em sua NDC (Contribuição Nacionalmente Determinada), quais sejam: (i) redução das emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025; e (ii) sinalizou uma contribuição indicativa subsequente de redução de 43% abaixo dos níveis de emissão de 2005, em 2030⁴.

Em vista desse movimento, em maio de 2016, por meio da Portaria MMA 150, foi instituído o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNAMC), com o objetivo de promover a gestão e redução do risco climático no país frente aos efeitos adversos associados à mudança do clima, de forma a aproveitar as oportunidades emergentes, evitar perdas e danos e construir instrumentos que permitam à adaptação dos sistemas naturais, humanos, produtivos e de infraestrutura (BRASIL, 2016)⁵.

Como a matriz energética brasileira tem forte participação de origem hidráulica, ter uma análise mais precisa das emissões de carbono dessa fonte em especial, nos parece algo fundamental e bastante pertinente.

³ Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm. Último acesso em 07/03/2017.

⁴ Informação disponível em: <http://www.mma.gov.br/comunicacao/item/10570-indc-contribuicao-nacionalmente-determinada>. Acesso em: 08/02/2016.

⁵ Disponível em: http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80182/Portaria%20PNA%20_150_10052016.pdf. Último acesso em: 07/03/2017.

4 METODOLOGIA

Esta pesquisa pode ser classificada como bibliográfica, em virtude de que foi produzida com base em relatórios, livros, periódicos, documentos técnicos, entre outros, bem como apresenta caráter documental, visto que parte do material bibliográfico pesquisado não possui tratamento analítico (SILVA & MENEZES, 2005). Por meio das bibliografias analisadas foi possível coletar os dados e os estudos já realizados a respeito da temática, favorecendo a interpretação das informações encontradas e dos conceitos necessários ao desenvolvimento do trabalho.

Logo, as pesquisas bibliográficas forneceram o devido embasamento teórico na preparação do trabalho. Como fontes de pesquisa foram utilizados livros, trabalhos acadêmicos, artigos científicos, relatórios técnicos, sites de Internet, entre outros.

A presente pesquisa também deve ser caracterizada como qualitativa, do tipo explicativa, por sua finalidade de descrição e decodificação de um sistema complexo de significados. Pois além de registrar, analisar e interpretar os fenômenos estudados em profundidade, visa identificar seus fatores determinantes e explicar os seus porquês. Por sua vez, a estratégia de pesquisa foi o estudo de caso, o qual consiste em uma investigação empírica de um fenômeno contemporâneo inserido em seu contexto. Nesta estratégia considera-se a unidade social como um todo e múltiplas fontes de evidência são utilizadas na composição e desenvolvimento da pesquisa; objetiva-se reunir um maior número de informações detalhadas a fim de apreender e descrever a complexidade do caso em questão. Dessa forma, particularidades são reveladas sem desvalorizar diferenças internas (YIN, 2001).

Por uma seleção inicial da bibliografia a ser utilizada, permitiu-se identificar tópicos mais específicos a serem abordados com a identificação de estudos em que a Análise de Ciclo de Vida (ACV) e a Pegada de Carbono (ferramentas analíticas) foram aplicadas, ou mesmo estudos que apontam uma potencial aplicação dessas ferramentas. Ademais, foram selecionadas informações metodológicas sobre a coleta de dados para elaboração de um relatório sobre a Pegada de Carbono do produto - energia hidráulica e dados necessários aos relatórios, que são emitidos por meio da utilização das ferramentas analíticas.

Foi dado enfoque como pauta da pesquisa (i) nas metodologias utilizadas para a contabilização, como GHG Protocol e ISO 14.067:2013; (ii) na formação de bancos de dados necessários para a quantificação das emissões de carbono e o uso da metodologia do IPCC; (iii) na utilização de dados e (iv) na perspectiva utilizada para tratar da Pegada de Carbono, ante a premissa da necessidade de melhoria da qualidade do ar e esforços para conter as alterações climáticas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 A Ferramenta Analítica da Pegada de Carbono

As pegadas ambientais são ferramentas em que se propõe avaliar e quantificar o impacto de determinada atividade ou indivíduo no meio ambiente, podendo ter diferentes enfoques a depender do recurso natural que se pretende analisar. Por exemplo: pegada hídrica, pegada de carbono e pegada ecológica.

Cada enfoque privilegia a análise do impacto de determinado recurso natural no ciclo de vida de um produto. Assim, a Pegada ecológica mede a quantidade de recursos naturais renováveis para manter determinado estilo de vida⁶. Por se propor a medir a utilização dos recursos naturais por determinado indivíduo, a pegada ecológica é mais ampla do que a pegada hídrica e a pegada de carbono, as quais estão dentro do escopo de cálculo da pegada ecológica.

A pegada hídrica representa o volume total de água doce que é utilizado para produzir os bens e serviços consumidos pelo indivíduo, comunidade ou produzidos pelas empresas⁷. Apesar de ser relevante para o setor hidrelétrico, em especial em um contexto recente de crise hídrica, este trabalho se limitará a abordar a pegada de carbono.

Em razão do impulso e notoriedade de questões relacionadas atualmente ao aquecimento global, a Pegada de Carbono foi escolhida para este estudo por tratar-se de uma ferramenta utilizada para análise do impacto de mudanças climáticas, principalmente por otimizar o gerenciamento das emissões.

Conceitua-se, neste trabalho, pegada de carbono como uma ferramenta analítica para medir a quantidade total das emissões de gases do efeito estufa causadas diretamente e indiretamente por uma pessoa, organização, evento ou produto (EPSTEIN *et al.*, 2011). Através dessa ferramenta, pode-se obter a quantidade de gases emitidos/absorvidos em toda a cadeia de produção de determinado produto, avaliando-se o impacto dessas emissões para fins das mudanças climáticas, e, ao final, emite-se um relatório de Pegada de Carbono. Para essa análise é fundamental que seja levantada a quantidade de gases emitidos/absorvidos, trazendo um protagonismo interessante para o inventário que vai substanciar o relatório final.

Adicionalmente, pode-se observar que a Pegada de Carbono possui uma similaridade com a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de um produto, especialmente quando se considera apenas o impacto final daquele produto em termos de mudanças climáticas, já que em ambos os casos o inventário é o grande protagonista a fundamentar as conclusões e tomadas de decisão, conforme será demonstrado a seguir.

⁶ Para mais informações: <http://www.pegadaecologica.org.br/2015/index.php>. Último acesso em 31.07.2017.

⁷ Para mais informações: <http://www.pegadahidrica.org/?page=files/home>. Último acesso em 31.07.2017.

5.2 Similaridade entre a Avaliação de Ciclo de Vida em termos de Emissões e a Pegada de Carbono, e suas Contribuições para a Tomada de Decisão.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto, serviço, processo ou material⁸ utilizando informações ambientalmente relevantes ao longo de todo o seu ciclo de vida (isto é, do “berço ao túmulo”). Todo o ciclo de vida corresponde à análise desde a extração e processamento da matéria prima até o descarte final, passando pelas fases de transformação e beneficiamento, transporte, distribuição, uso, reuso, manutenção e reciclagem (VIGON *et al.*, 1994). As categorias gerais de impactos ambientais que precisam ser consideradas na análise incluem: o uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas.

De acordo com a agência americana EPA - *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 2015), a avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta para avaliar os impactos potenciais de um produto, material, processo ou atividade:

“A life-cycle assessment (LCA) is a tool that can be used to evaluate the potential environmental impacts of a product, material, process, or activity. An LCA is a comprehensive method for assessing a range of environmental impacts across the full life cycle of a product system, from materials acquisition to manufacturing, use, and final disposition”.

Em vista disso, a ACV é importante por se constituir em uma ferramenta que trata com clareza e objetividade de questões ambientais complexas, tais como:

- Gerenciamento de recursos naturais;
- Identificação dos pontos críticos de um determinado produto/processo;
- Otimização de sistemas de produtos;
- Desenvolvimento de novos serviços e produtos;
- Otimização de sistemas de reciclagem para os diversos materiais;
- Definição de parâmetros para atribuição de rótulo ambiental a um determinado produto.

Essa avaliação dos aspectos ambientais pode ter seu escopo amplo ou reduzido, a depender do objetivo daquele que utilizará o estudo. Toda ACV possui a mesma estrutura, mas com um leque ampliado de aplicações, desde pegadas de carbono, declarações ambientais de produto (DAP), balanço de consumo de água potável, entre outras.

Portanto, pode ser avaliado apenas um determinado recurso natural, omitindo-se da análise os demais impactos ambientais relacionados ao mesmo produto. Esse é, senão, o caso do presente trabalho que terá enfoque na metodologia para quantificação de carbono e sua utilização para fins de avaliação de impactos relacionados às mudanças climáticas, ou seja, a perspectiva abordada será a Pegada de Carbono.

A pegada de carbono de um produto parte da mesma premissa de uma ACV, e ambas as ferramentas analíticas fazem a análise de impactos baseada em um inventário de dados. No caso da ACV, por exemplo, o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é uma aferição quantitativa de todas as cargas ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto (JOHN *et al.*, 2008).

No caso da pegada de carbono o cálculo também deve contar com um inventário das emissões de carbono, que, assim como na ACV, contemplará as informações relevantes de emissões/remoções de carbono, que serão utilizadas para fundamentar o relatório e as conclusões referentes ao nível de emissões de determinada atividade/categoria.

⁸ Conceito disponível na NBR ISO 14040.

Assim, mostra-se relevante que o inventário seja composto com informações acuradas ou, ao menos, a aferição mais próxima possível do real, definindo-se uma metodologia adequada para a coleta dos dados, de forma a permitir uma correta interpretação final dos resultados. Afinal de contas, dados estimados podem possuir acentuado viés, levando à interpretação incorreta dos impactos ambientais e emissões, no caso da Pegada de Carbono, associados a um produto ou atividade.

Neste trabalho a utilização da ferramenta de Pegada de Carbono será analisada criticamente no tocante à sua utilização para fins da tomada de decisões e emissão de relatórios, fundamentados em dados de emissões da energia hidrelétrica até a fase de produção dessa energia, sem avaliar a transmissão dela e demais impactos relacionados ao consumo. Isso se justifica porque as rotas destas fases (transmissão e consumo) são muito complexas e na grande maioria das vezes não se tem informações suficientes e precisas para serem usadas. Além disso, a hipótese desse trabalho parte da aplicação da Pegada de Carbono na tomada de decisões sobre o tipo de investimento em produção de energia, considerando compromissos de redução de emissões de GEE pelo Brasil.

5.3 As Principais Metodologias utilizadas para Estimativa de Emissões de Carbono

Dentre as metodologias mais aplicadas para o inventário e/ou quantificação de carbono destacam-se: IPCC, PAS 2050, GHG Protocol e ISO 14.067:2013.

A metodologia do IPCC é usada na quantificação das emissões e tem origem na necessidade de haver uma metodologia comparável nos inventários nacionais daqueles países signatários da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQNUMC)⁹. Isso porque os países signatários da CQNUMC se comprometeram a elaborar anualmente inventários nacionais de emissões, conforme se depreende da análise do texto da convenção, promulgada no Brasil através do Decreto 2.652/98:

"Artigo 4. 1. Todas as Partes, levando em conta suas responsabilidades comuns mas diferenciadas e suas prioridades de desenvolvimento, objetivos e circunstâncias específicos, nacionais e regionais, devem: a) Elaborar, atualizar periodicamente, publicar e por à disposição da Conferência das Partes, em conformidade com o Artigo 12, inventários nacionais de emissões antrópicas por fontes e das remoções por sumidouros de todos os gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, empregando metodologias comparáveis a serem adotadas pela Conferência das Partes; (...)

Artigo 12.1. Em conformidade com o Artigo 4, parágrafo 1, cada Parte deve transmitir à Conferência das Partes por meio do Secretariado, as seguintes informações: a) Inventário nacional de emissões antrópicas por fontes e de remoções por sumidouros de todos os gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, dentro de suas possibilidades, usando metodologias comparáveis desenvolvidas e aprovadas pela Conferência das Partes; (...)"

Nesse contexto, para auxiliar nessa padronização dos inventários, o IPCC elaborou um guia metodológico para os inventários de emissões antropogênicas por fontes e remoções por sumidouros de GEE. A versão mais recente do Guia é de 2006 chamada de *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006 IPCC Guidelines)*. Além das instruções metodológicas, o referido guia destaca que a elaboração dos inventários deve estar

⁹ A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas tem o objetivo primordial de reunir esforços entre os países para estabilizar as concentrações de GEE em níveis que não implicassem alterações climáticas perigosas. Para mais informações: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2010/11/a-convencao>. Último acesso em 21/09/2017.

baseada nas boas práticas e por boas práticas deve-se entender inventários que não contenham sub-estimativas e trabalhem com a redução máxima de incertezas¹⁰.

Os métodos para estimação dos GEE são divididos em três níveis, chamados *tiers*. A metodologia envolve métodos com especificações matemáticas, informações relacionadas aos fatores de emissão ou outros parâmetros para serem usados na estimação, além de dados da atividade para estimar uma visão geral dos níveis de emissões (como o balanço entre emissões e remoções por sumidouros). O IPCC cita que devidamente implementados, todos os *tiers* são capazes de fornecer estimativas imparciais, sendo que precisão e exatidão melhoram com a evolução do *tier* 1 para o 3. O *tier* 1 o método *default* e o *tier* 3 o mais detalhado e específico para cada categoria e região.

A divisão em *tiers* foi justificada para que as partes, ao elaborarem seus inventários, possam utilizar métodos consistentes com seus recursos e focar seus esforços nas categorias que sejam mais significativas para suas respectivas emissões.

A abordagem estabelecida pelo Guia do IPCC de 2006 sobre qual *tier* utilizar indica a utilização do método de árvore de decisão ("*decision tree*"), que direciona para decidir qual *tier* será usado para a categoria a ser inventariada, considerando especificidades locais. As categorias mais importantes são chamadas de "categorias chaves".

As demais metodologias seriam a PAS 2050, GHG Protocol e ISO 14.067:2013 que tratam da contabilização das emissões, porém não trazem métodos próprios para a elaboração dos inventários, mas sim para a elaboração dos relatórios de emissão utilizando uma base de dados gerada através da quantificação dos gases (geralmente utilizam os inventários baseados na metodologia do IPCC).

A metodologia PAS - *Publicly Available Specification* 2050 foi criada em 2008, posteriormente revisada e reeditada em 2011, pelo grupo BSI na Inglaterra e foi a primeira metodologia estrutural de pegada de carbono empregada para acessar o ciclo de vida de emissões de GEE para bens e serviços.

O desenvolvimento da PAS 2050 foi uma resposta para a comunidade e indústria que desejavam um método consistente de ciclo de vida para as emissões de GEE. A PAS 2050 provê um método de conhecimento das emissões de GEE com o principal objetivo de promover uma base comum para a quantificação das emissões de GEE que propiciarão programas de redução dessas emissões (PAS 2050:2011).

O PAS 2050 é focado apenas em uma categoria de impacto: as emissões de GEE e suas contribuições para a mudança do clima, mas a própria metodologia ressalta que as decisões decorrentes da análise de apenas uma categoria de impacto pode gerar consequências para outras categorias. A análise e aplicação dos resultados deve ser feita de forma cuidadosa.

No entanto, apesar da relevância histórica do PAS 2050, neste trabalho serão analisadas com destaque as metodologias para elaboração do relatório da ISO 14.067 e GHG *Protocol*, com adaptações para o contexto nacional, além da metodologia do IPCC naquilo que se refere ao inventário de dados, em razão da probabilidade de maior aplicabilidade de tais metodologias para o setor de hidroeletricidade.

De maneira introdutória, ressalte-se que por meio da ISO TS 14067:2013 foi padronizada a contabilização dos dados por meio de ferramentas de cálculo usando pegadas de carbono. A especificação técnica determina orientações para a contabilização e a comunicação da pegada de carbono, baseando-se (i) para a contabilização de dados: normas relacionadas à Análise do Ciclo de Vida (ISO 14040 e ISO 14044) e (ii) para comunicação:

¹⁰ De acordo com Albuquerque (2012) "*Incerteza é o parâmetro associado com o resultado da quantificação que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à grandeza quantificada (ISO 14064-1)*".

normas relacionadas às declarações ambientais e rótulos (ISO 14020, ISO 14024 e ISO 14025).

A importância da metodologia de quantificação do *GHG Protocol*, por sua vez, fundamenta-se na sua adaptação ao contexto nacional, de forma a melhorar a qualidade das informações colhidas e reportadas.

Cumpra ressaltar, que tanto as metodologias ISO 14067:2013 quanto a *GHG Protocol* apontam formas de contabilização de GEE e acabam se utilizando e/ou indicando como metodologia de cálculo para a quantificação das emissões àquelas contidas nos *tiers*¹¹ do IPCC. A questão é que ao se utilizar de dados do IPCC, ao invés de dados primários coletados em reservatórios nacionais, especialmente do método *default*, pode haver distorções de informações, isso em razão dos parâmetros de cálculo que não são direcionados ao contexto nacional – variáveis ambientais diversas como: zonas tropicais, diferentes biomas, entre outros fatores ambientais e climáticos que podem influenciar no volume de emissões.

5.4 A Pegada de Carbono e Relatório de Emissões de Carbono da Energia Hidráulica

Inicialmente contextualizem-se as peculiaridades e procedimentos nacionais no tocante à produção de energia hidráulica. No Brasil, o desenvolvimento do potencial hidrelétrico de uma bacia demanda a realização de diversos estudos, no contexto regulatório, divididos em cinco etapas: (i) estimativa do potencial hidrelétrico; (ii) inventário hidrelétrico; (iii) estudo de viabilidade; (iv) projeto básico; e (v) projeto executivo (MME, 2007 *apud* TOLMASQUIM, 2016).

Considerando, portanto, todas essas etapas, a pegada de carbono pode, então, contribuir para a análise do potencial hidrelétrico com foco na gestão das emissões de GEE, especialmente se realizada durante a terceira etapa (estudo de viabilidade). Isso porque é nessa etapa que é realizado o Estudo de Impacto Ambiental (EIA), que irá fundamentar uma eventual licença ambiental prévia (TOLMASQUIM, 2016).

Assim, nesse momento, é possível utilizar a ferramenta para avaliar custos e benefícios de um determinado projeto, inclusive com a ampliação e aperfeiçoamento técnico da capacidade de um empreendimento existente, podendo adaptá-lo no intuito de reduzir as emissões projetadas e consequentemente atender aos interesses e metas nacionais de redução das emissões.

Em relação aos estudos sobre o ciclo de vida das emissões de carbono na produção de energia hidráulica observa-se que atualmente são incipientes, tanto em nível mundial quanto no Brasil (CARRINGTON, 2000; GAGNON *et al.*, 2002; PACCA & HORVATH, 2002; COLTRO *et al.*, 2003; YOKOTE, 2003; WEISSER, 2007; RIBEIRO & DA SILVA, 2010; STEINHURST *et al.*, 2012; entre outros). Isso ocorre em parte, por causa da dificuldade de se conseguir dados das emissões de GEE ao longo das atividades do empreendimento (desde a construção até o funcionamento, etc.), por isso, a grande maioria destes estudos é feita usando dados de emissões brutas (apenas na fase operacional das hidrelétricas), sem avaliar àquelas emissões antes da implantação do empreendimento e, principalmente, em todo seu ciclo de vida. Ressalva-se, todavia, que mesmo quando fazem análise do ciclo de vida estas são pontuais, e não para todo o parque hidroelétrico do país.

No trabalho de Pacca & Horward (2002) estudou-se o efeito do aquecimento global associado à construção e operação de várias fontes de energia (Hidrelétrica, Eólica, Solar, Térmicas a carvão e gás natural) em 4 períodos (10, 20, 30 e 40 anos) após a construção. Para isso, usou dados das emissões de GEE nas fases de construção, queima de combustíveis

¹¹ Abordagem metodológica que deve ser de acordo com a complexidade e detalhamento dos dados.

fósseis, decaimento da biomassa inundada no reservatório, perda da produção líquida do ecossistema e uso da terra, além de ter aplicado a ACV. Os resultados deste trabalho indicaram que usinas eólicas e hidrelétricas em zonas áridas parecem ter emissões de GEE mais baixas do que as outras fontes de energia.

Já Ribeiro & Da Silva (2010) fizeram uma análise de ciclo de vida da hidrelétrica de Itaipu para obter o inventário de ciclo de vida (ICV) nesta hidrelétrica, em termos de emissões de GEE. Neste estudo foram usados dados do primeiro inventário brasileiro de emissões de GEE em reservatórios brasileiros, publicado pelo MCTiC em 2001, bem como estimativas das emissões em todas as etapas da construção até a produção de energia. Os resultados mostraram que em comparação com outros estudos de hidrelétrica haveria uma economia de escala para trocas de materiais e de energia, no caso de Itaipu.

Outro trabalho relacionado foi realizado por Steinhurst *et al.* (2012), por meio de um estudo de revisão envolvendo ACV, que mostrou que as hidrelétricas emitem GEE, mas que a taxa de emissões por unidade de energia gerada de hidrelétrica (excluindo aquelas tropicais) é muito menor do que as tecnologias de combustíveis fósseis. Ao final estes autores concluíram ainda que a ACV é claramente o melhor método para comparar as emissões de GEE de instalações de geração de energia.

Em vista do exposto acima, podemos verificar que há poucos estudos relacionados ao uso da ACV e/ou Pegada de Carbono para quantificar as emissões de GEE no setor hidrelétrico, principalmente no Brasil. Essa reflexão fica clara quando se percebe que o próprio GHG *Protocol* adaptado para o contexto nacional só emitiu uma nota técnica recentemente (março de 2017) para tornar obrigatória a quantificação e o relatório de emissões para mudança do uso do solo (categoria que as hidrelétricas com reservatórios se inserem). Ou seja, até 2017 a quantificação de emissões para atividades inerentes à mudança do uso do solo não era obrigatória.

A fragilidade no tocante à quantidade de estudos e estabelecimento de premissas básicas quando se trata de emissões de hidrelétricas com reservatórios se deve, conforme já destacado em momento anterior, a existência de uma razoável incerteza no tocante às emissões líquidas desses empreendimentos, o que pode ser mais bem avaliado se utilizada a ACV e/ou Pegada de carbono na produção de energia para a tomada de decisões que privilegiem a eficiente gestão das emissões de GEE no setor de energia elétrica.

5.4.1 Metodologia GHG *Protocol*/FGV

De acordo com o site do Programa Brasileiro GHG *Protocol*¹², o GHG *Protocol* é uma ferramenta utilizada para entender, quantificar e gerenciar emissões de GEE. Foi originalmente desenvolvida nos Estados Unidos, em 1998, pelo *World Resources Institute* (WRI), e procurou ser compatível com a norma ISO 14.064 e com os métodos de quantificação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). Esse método foi adaptado para o contexto brasileiro em 2008.

Para a utilização nacional, a implementação do Programa foi uma iniciativa do Centro de Estudos em Sustentabilidade, da Fundação Getúlio Vargas (FGV), e do *World Resources Institute* (WRI), em parceria com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS) e o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD).

¹² Para mais informações: <http://www.ghgprotocolbrasil.com.br>. Último acesso em 27/07/2017.

O programa brasileiro de GHG *Protocol* é de adesão voluntária e as informações geradas, utilizando sua metodologia, podem ser aplicadas em relatórios e questionários de iniciativas importantes, como *Carbon Disclosure Project* (CDP), Índice Bovespa de Sustentabilidade Empresarial (ISE) e *Global Reporting Initiative* (GRI)¹³.

A utilização da metodologia GHG *Protocol* para a elaboração de relatórios de Pegada de Carbono para hidrelétricas com reservatórios não vem sendo aplicada. Isso se deve, inclusive, a falta de obrigatoriedade até há pouco tempo de se reportar emissões decorrentes da mudança do uso do solo. Note que apenas recentemente foi publicada uma nota técnica (NT)¹⁴ para orientar a contabilização das emissões em categorias de mudança do uso do solo - onde se inserem os reservatórios de hidrelétricas.

De acordo com a NT só será obrigatória a contabilização das emissões ou remoções provenientes de mudança do uso do solo a partir do ciclo de 2017 e que a contabilização em anos anteriores ao inventário de 2016 terão sua contabilização de forma opcional.

Por uso do solo deve-se entender, em conformidade com a NT:

"a maneira a partir da qual o território é explorado e/ou ocupado pelas atividades humanas. Nesse sentido, as chamadas mudanças no uso do solo (também conhecidas como LUC – Land Use Change) ocorrem quando são realizadas conversões entre as diferentes categorias de uso e que, conseqüentemente, podem gerar fluxos de CO₂ (emissões e remoções)."

Esses fluxos de CO₂, por sua vez, devem ser quantificados e contabilizados nos inventários de emissão de GEE das organizações da seguinte maneira, conforme a já mencionada NT¹⁵:

- *As emissões de CO₂ referentes às conversões de área de vegetação primária para qualquer outro tipo de uso do solo devem ser contabilizadas como emissões da categoria "Mudanças no uso do solo" (Escopo 1) ou nas categorias de Escopo 3, de acordo com cada situação. Estas emissões não devem, em hipótese alguma, ser classificadas como emissões de CO₂ biogênico, pois o carbono estocado na vegetação primária é permanentemente perdido para a atmosfera com a mudança no uso do solo;*
- *As emissões de CO₂ referentes a quaisquer conversões no uso do solo que resultem em diminuição do estoque de C, exceto a citada no item acima, devem ser contabilizadas e relatadas na categoria "Emissão de CO₂ biogênico" para cada escopo que seja aplicável;*
- *As remoções de CO₂ referentes a quaisquer conversões no uso do solo realizadas por uma organização que resultem num aumento de estoque de C devem ser contabilizadas e relatadas na categoria "Remoção de CO₂ biogênico" para cada escopo que seja aplicável. Isto deve-se ao fato de não ser possível garantir que esta remoção de CO₂ da atmosfera será permanente.*

Ainda, de acordo com a referida NT, os fluxos de contabilização obrigatória nos inventários de GEE são: (i) Emissões referentes à decomposição de matéria orgânica morta (MOM); (ii) Emissões referentes à combustão de biomassa; (iii) Emissões e remoções por supressão/crescimento de biomassa lenhosa (acima e abaixo do solo); (iv) Emissões e remoções dos estoques orgânicos de C nos solos; (v) Emissões referentes a distúrbios naturais (queimadas, vendavais, tempestades, secas, pragas, etc.).

¹³ Informações obtidas através do site do Programa Brasileiro GHG *Protocol*.

¹⁴ Para mais informações: http://mediadrawer.gvces.com.br/ghg/original/ghg-protocol_nota-tecnica_agro_v1.pdf.

¹⁵ Para mais informações: http://mediadrawer.gvces.com.br/ghg/original/ghg-protocol_nota-tecnica_agro-mudanca-uso-solo_v2.pdf.

A NT divide as fontes de emissão: (i) mecânicas e (ii) não mecânicas. Além disso, é importante ressaltar que no que se refere às remoções de carbono, o Programa Brasileiro GHG *Protocol*, apesar de admitir a existência de remoção de CO₂ em ambientes naturais, não adota o conceito de emissões líquidas, apenas orienta que as organizações relatem as emissões e remoções separadamente.

Por fim, mas não menos relevante, o GHG *Agricultural Guidance* ressalta que traz apenas métodos de contabilização para as estimativas dos fluxos de CO₂ e variações nos estoques de C das organizações, e que para a quantificação dessas emissões sugere-se a consulta do anexo III do GHG *Agricultural Guidance*, anexo que contém uma série de ferramentas disponíveis para este propósito.

Mais uma vez, destaca-se, portanto, que a quantificação para a formação do inventário, ou seja, a base de dados é o grande diferencial nos resultados, pois é no inventário que se sustenta toda a contabilização e, por sua vez, os resultados apresentados. A metodologia a ser utilizada para a formação do inventário será o grande diferencial na interpretação dos resultados do relatório de Pegada de Carbono e para esse propósito será analisada adiante a metodologia do IPCC.

Assim, além da metodologia utilizada para a contabilização das emissões (por exemplo, GHG *Protocol*, PAS 2050 ou ISO 14067), é preciso definir a metodologia da quantificação das emissões, geralmente usada a do IPCC. Um relatório emitido com base na mesma metodologia de contabilização pode ter diferentes resultados, a depender do método de quantificação escolhido.

Por fim, voltando para a utilização do GHG *Protocol*, uma vez relatadas às emissões sob essa metodologia é possível dar publicidade às informações geradas por meio do Registro Público de Emissões¹⁶. Esse registro é uma plataforma que promove publicidade dos inventários de emissões. Por meio da plataforma, objetiva-se a criação de um banco de dados que facilite o estabelecimento de *benchmarks*¹⁷ setoriais e que sirva de apoio à elaboração de políticas públicas coerentes para comunicação das informações de GEE e também à promoção do reconhecimento das organizações participantes pela iniciativa voluntária de transparência, frente aos tomadores de decisão (*stakeholders*) cada vez mais atentos à responsabilidade socioambiental corporativa.

¹⁶ Para mais informações: www.registropublicodeemissoes.com.br.

¹⁷ Marcas de referência.

5.4.2 Breve análise sobre a metodologia ISO 14.067:2013

A ISO desenvolveu uma metodologia própria para a Pegada de Carbono por meio da ISO 14.067:2013, onde são previstos princípios, requisitos e instruções para a contabilização e a comunicação da pegada de carbono de um produto, baseando-se para a contabilização em patamares internacionais da análise do ciclo de vida (ISO 14040 e ISO 14044) e para comunicação nas normas ISO 14020, ISO12024, ISO 14025. A ISO 14.067:2013 é, portanto, uma mistura de diversas normas da própria ISO, que procurou aperfeiçoar normas pré-existentes para a contabilização de carbono e emissão de um relatório de Pegada de Carbono.

Através da ISO 14.067:2013 avalia-se apenas a categoria de impacto de mudanças climáticas, conceituando a "*Pegada de Carbono de um produto*" como a "*soma das emissões de GEE e remoções do sistema, expressas em CO₂ equivalente¹⁸ e baseada na análise do ciclo de vida usando apenas a categoria de impacto de mudanças climáticas*" (ISO 14.067). Por essa descrição conclui-se que para a ISO14.067, a pegada de carbono é a parte de uma análise do ciclo de vida limitada aos impactos associados às mudanças climáticas.

O objetivo da pegada de carbono, nesse caso, é calcular o potencial de contribuição de um determinado produto para o aquecimento global expresso em CO₂ através da quantificação de todas as emissões e remoções significativas de GEE no ciclo de vida do produto. Ressalta-se que os limites da metodologia do cálculo podem ser diferentes a depender dos objetivos do estudo.

No que se refere à coleta de dados, deve ser dada preferência à realizada diretamente do local sob análise. Essa coleta refere-se às emissões diretas de GEE (determinadas através do monitoramento, estequiometria, balanço de massa ou método similar), informações da atividade (entradas e saídas do processo que resultem em emissões ou absorções de GEE) ou fatores de emissão. Podem ser coletados dados de um local específicos ou pode ser feita uma média de todas unidades que contém o mesmo processo produtivo sob estudo. Os GEE podem ser medidos ou modelados desde que o resultado seja específico para o processo de análise do ciclo de vida do produto.

Dados primários ou secundários, quando não são específicos do lugar reportado, só devem ser utilizados para entradas quando a coleta específica não for possível ou para um processo de menos importância e que inclua referências bibliográficas como *default* dos fatores de emissões, dados do cálculo, estimações e outros dados representativos. Consequentemente, dados primários que não são específicos do lugar, mas baseados em uma média global ou regional, coletados por organizações regionais ou internacionais e que tenham sido verificados por terceiros, devem ser priorizados quando a coleta específica da unidade não for viável. Já os dados secundários devem ser documentados e justificados com as referências no relatório de pegada de carbono.

Portanto, o relatório de pegada de carbono deve usar dados que reduzam a incerteza, com a melhor qualidade de dados disponíveis. Dados primários e secundários devem ser selecionados para atingir o objetivo do estudo.

As organizações que elaboram os relatórios de pegadas de carbono devem ter um sistema de gerenciamento dos dados e procurar continuamente melhorar sua consistência e qualidade. Deve-se salvaguardar a consistência das quantificações, já que diferentes abordagens poderão levar a diferentes resultados.

¹⁸ O CO₂ equivalente é calculado através da multiplicação de uma quantidade específica de determinado GEE pelo potencial de aquecimento global desse gás. O potencial de aquecimento global por sua vez é um fator caracterizado pela força do impacto radioativo de uma unidade massa de determinado GEE, em relação ao CO₂, considerando um determinado período (ISO14067).

Quando as emissões e absorções de GEE são significativas e decorrentes da mudança do uso da terra, essa quantificação deve estar de acordo com métodos internacionalmente conhecidos, como, por exemplo, as instruções do IPCC para Inventários de Emissões de GEE nacionais. As emissões e absorções de GEE pela mudança no uso da terra devem estar documentadas separadamente no relatório de Pegada de Carbono e devem ser transparentemente documentadas.

Além disso, quando o CO₂ é capturado como carbono em um produto por um tempo determinado, essa captura de carbono também deve ser reportada separadamente. Tal informação deve constar em relatório à parte, assim como no caso de mudanças do uso da terra, quando se faz a análise berço-túmulo e há uma captura relevante de carbono que deve ser mantida na cadeia de valor.

Na fase de análise dos impactos do ciclo de vida, o potencial impacto em aquecimento global¹⁹ de cada GEE emitido e absorvido do produto deve ser calculado multiplicando-se a massa do GEE pelos valores divulgados pelo IPCC.

Assim, o propósito de um relatório de Pegada de Carbono é documentar os resultados de quantificações do caso estudado, de maneira a apresentar decisões em conformidade com os objetivos e escopo definidos, de maneira a demonstrar que as provisões técnicas foram cumpridas.

Os resultados e conclusões da Pegada de Carbono devem estar contidos em documentos anexados ao relatório, tendo transparência na divulgação: dos resultados, informações, métodos, suposições e interpretações da análise do ciclo de vida.

Destaca-se que se for utilizada uma abordagem nacional, as informações devem estar baseadas em um estudo confiável e estar documentadas no relatório. Todas as escolhas e suposições devem estar justificadas e documentadas no relatório de Pegada de Carbono.

Mesmo assim, apesar de toda essa preocupação com a transparência, a norma chama atenção para a possibilidade do resultado do relatório apresentar discrepâncias com a realidade. Isso porque no anexo B, a metodologia da ISO destaca a limitação metodológica existente em relação à disponibilidade e seleção apropriada de informações contidas no inventário do ciclo de vida (que dará toda robustez ao relatório do ciclo de vida, com enfoque em mudanças climáticas). Novamente, verifica-se a necessidade de haver um inventário de dados fidedigno do contexto Brasileiro em termos de metodologia e quantificação dos fluxos de GEE.

A ISO não apenas esclarece, mas também reconhece que certas informações podem estar vinculadas a uma área geográfica específica e que restrições metodológicas podem influenciar o resultado dos cálculos. Em razão disso há uma limitação na acurácia dos dados.

Ainda sobre a necessidade de haver um inventário robusto de dados, ambas as metodologias acima mencionadas (ISO14067:2013 e a *GHG Protocol*) destacam que, no inventário, a coleta de dados é o ponto delicado na elaboração dos relatórios finais e com isso gerar relatórios mais fidedignos. Isso porque existe uma dificuldade em se coletar dados primários, especialmente nos ambientes naturais.

Para esclarecer mais detalhadamente a complexidade da coleta de dados e quantificação das emissões, primeiramente cumpre relatar as abordagens quantitativas dos fluxos de carbono, dado a seguir.

¹⁹ O potencial de aquecimento global (GWP, em inglês) é baseado nas propriedades radiativas de uma mistura de GEE, usando a energia radiativa da massa de unidade de determinado gás nos dias atuais através de um determinado tempo futuro, relacionando-se com o dióxido de carbono, principalmente para um horizonte de 100 anos (IPCC).

5.5 Quantificação dos Fluxos de Carbono - Emissão e Remoção

Conforme já destacado, as metodologias de Pegada de Carbono apresentadas estão relacionadas à contabilização das emissões e não à sua quantificação. Sendo assim, os métodos de contabilização estabelecem quais as fontes de emissão e as atividades que devem ser monitoradas, enquanto que os métodos de quantificação estão relacionados à mensuração e/ou cálculo das emissões decorrentes das fontes e atividades emissoras previamente definidas pelos limites de contabilização. De acordo com GVCES (2015) os métodos de quantificação podem seguir abordagens baseadas em (i) cálculos, (ii) métodos-padrão ou (iii) por balanço de massas, além de (iv) abordagens baseadas em medição direta.

No caso das hidrelétricas ainda não está claro se seriam ou não fontes limpas de produção de energia elétrica, apesar de renováveis. Os trabalhos científicos para determinar a pegada de carbono nesse tipo de geração de energia têm contribuído para o avanço do conhecimento sobre o assunto, todavia ainda existem lacunas a serem preenchidas de informações relacionadas à qualidade das estimativas de carbono (MENDONÇA *et al.*, 2012).

A quantificação das emissões está, portanto, intimamente relacionada com os inventários de emissões tornando a elaboração desses inventários, tanto para ambientes naturais quanto antropizados (por exemplo, reservatórios hidrelétricos), o detalhe que fragiliza as informações geradas através de relatórios de Pegada de Carbono.

5.5.1 Abordagem baseada em cálculos

Esta abordagem de método-padrão (Cálculo) por ser simples é aplicada nos casos em que um combustível ou material está diretamente relacionado com as emissões. Por isso, ela depende de dados da atividade (quantidade de combustível, de insumos usados na instalação/processo ou quantidade produzida por determinado material) e de parâmetros (fatores de emissão e fatores de oxidação ou conversão, no caso de reações químicas incompletas)²⁰. Na figura seguinte está apresentado esse tipo de abordagem.

Segundo GVCES (2015) os fatores de emissão são definidos através de regulamentação das obrigações de relato. No caso da Europa, por exemplo, o fator de emissão de CO₂ aplicado à combustão de biomassa é zero, ao passo que na Califórnia, os cálculos e métodos específicos são definidos para cada tipo de biomassa e para combustíveis que têm biomassa.

Portanto, o fator de emissão expressa uma relação fixa entre dados da atividade e emissões absolutas de GEE, com base em valores médios. Além disso, os fatores de oxidação dependem da eficiência de conversão dos equipamentos/motores em que são queimados os combustíveis.

Em vista do exposto acima, tais parâmetros podem ser bastante genéricos (quando se tratar de um fator de emissão internacional) ou refletir características específicas da planta ou agente emissor, a depender das premissas e dos dados/amostras para embasamento dos cálculos.

²⁰ No tocante as reações químicas incompletas, o fator de oxidação é usado para corrigir cálculos de emissões de combustão, enquanto que o fator de conversão corrige os números de emissões dos processos envolvidos.

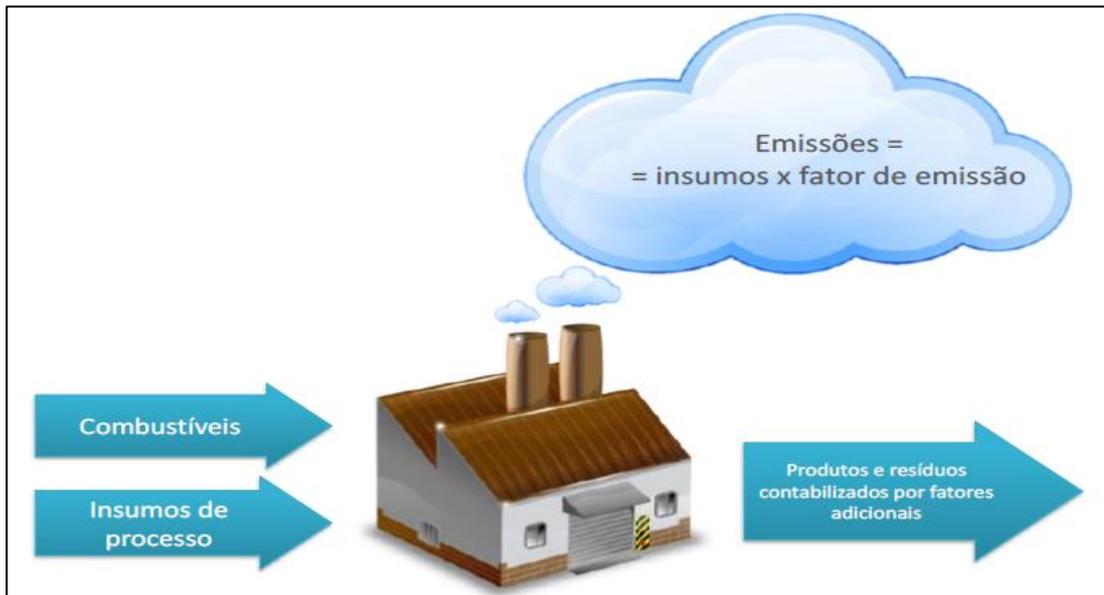


Figura 4: Abordagem baseada em Cálculos. Fonte: CE (2012) *apud* GVCES (2015, Anexo 1).

5.5.2 Abordagem baseada em balanço de massa

Outra opção a ser empregada é a abordagem de balanço de massa - apropriada para processos mais específicos, como os processos integrados da siderurgia e da indústria química. Nestes casos, torna-se difícil relacionar as emissões diretamente aos materiais de entrada porque os produtos (e resíduos) contêm uma quantidade significativa de carbono (por exemplo, produtos químicos orgânicos, fuligem etc.). Similarmente ao método-padrão, essa abordagem também é baseada em cálculos, porém fazendo, na maioria dos casos, um balanço completo de carbono que entra e sai da instalação ou de uma parte definida da mesma, conforme a Figura 5.

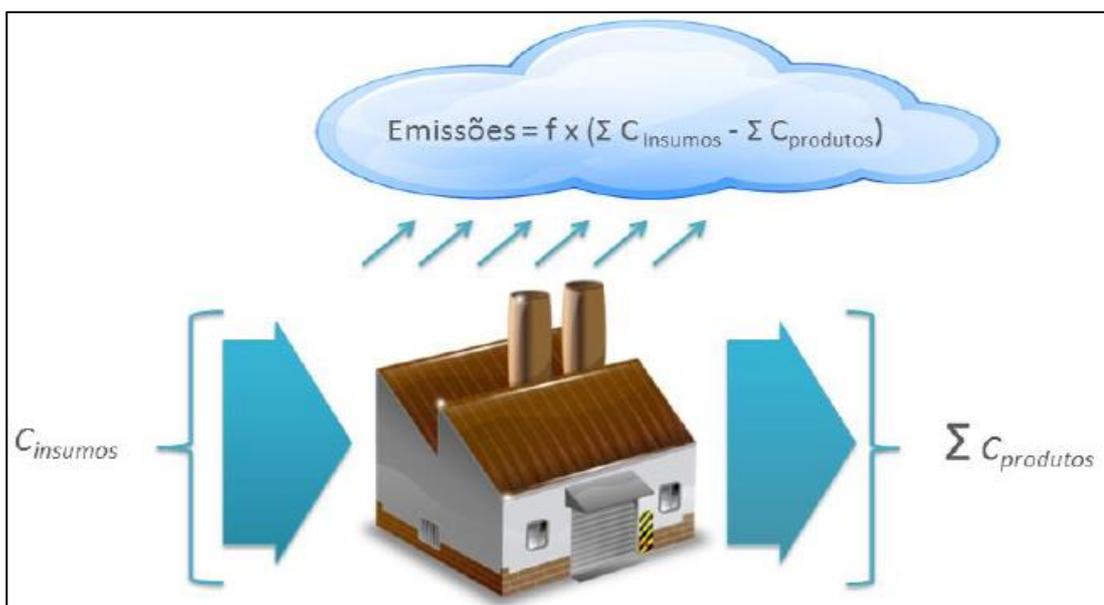


Figura 5: Princípio da Abordagem de Balanço de Massa. Fonte: CE (2012) *apud* GVCES (2015, Anexo 1).

5.5.3 Abordagem baseada em medição direta

Na abordagem baseada em medição direta as organizações/empresas devem monitorar suas emissões por meio de equipamentos/sistemas de medição contínua. Neste caso, a contabilização depende essencialmente da medição da concentração de GEE e do volume de gases onde a medição é realizada.

Em vista disso, o emprego dessa abordagem pode ser particularmente difícil para instalações com vários pontos de emissão, ou mesmo improvável principalmente no caso de emissões fugitivas. Contudo, sua principal vantagem estaria no fato de que ela independe dos tipos de combustíveis ou insumos usados, ou das relações estequiométricas²¹.

Além disso, a mensuração direta das emissões de GEE por meio do monitoramento da concentração e da taxa de fluxo não é comum, haja vista que, frequentemente, as emissões são calculadas com base em um balanço de massa ou em uma base estequiométrica específica para uma dada unidade ou a um processo (FGV/WRI, 2008).

Deve ser ressaltado que as abordagens baseadas em cálculo também exigem mensuração, embora, nestes casos, a medição é normalmente aplicada aos dados da atividade, ou seja, indicadores relacionados às emissões, tais como o consumo de combustível. Já nas abordagens baseadas em medição envolvem a medição direta da própria emissão do GEE.

5.5.4 A abordagem do IPCC para quantificação de gases de reservatórios

Portanto, pelo o que foi observado anteriormente, nota-se que as regras de contabilização e mensuração de emissões escolhidas devem lidar com o dilema entre especificidade e custo de monitoramento, uma vez que, quanto mais detalhado for, maior será a necessidade de obter dados específicos e empregar equipamentos de monitoramento, sensores, análises laboratoriais, entre outros, implicando custos mais elevados (FGV/WRI, 2008).

Ademais, em razão da diversidade de dados a serem obtidos em reservatórios de hidrelétricas, não há uma metodologia de coleta única levando a um vácuo metodológico direcionado para o contexto nacional e as peculiaridades inerentes ao Brasil, que possui zonas tropicais e outras diversidades climáticas.

Havendo, portanto, esse vácuo metodológico, os dados utilizados para fins de quantificação de emissões no Brasil acabam sendo aqueles divulgados pelo IPCC, cuja metodologia contém alguns parâmetros não muito adequados para a realidade nacional²². Os resultados, portanto, acabam deixando a desejar em termos de acurácia e precisão (MONICO *et al.*, 2009).

Para que se possa avaliar o nível de qualidade dos dados e a precisão dos métodos de quantificação, estes geralmente são classificados em *tiers* (FGV/WRI, 2008). Em vista disso, o IPCC, por exemplo, indica métodos para estimativa de emissões em três níveis de detalhes para inventários nacionais: sendo o *tier* 1 o método *default* do IPCC e o *tier* 3 o método mais detalhado, o que contribui para maior acurácia dos cálculos. Assim, quanto maior o *tier*, menor é a incerteza associada às estimativas.

Apenas para fins exemplificativos, ressalte-se que o sistema europeu de comércio de emissões aplica a mesma lógica classificatória para o relato de emissões por instalação²³. Portanto, a existência de diferentes níveis de detalhamento permite a utilização de métodos

²¹ É o cálculo das quantidades de reagentes e produtos que participam de uma reação.

²² Não são levados em considerações características especiais climáticas e ambientais para as regiões brasileiras.

²³ Ver detalhes nos Anexos II e III do Regulamento nº 601/2012 da Comissão Europeia (CE, 2012).

consistentes com os recursos e dados disponíveis e o direcionamento de esforços para categorias de emissões mais significativas.

Dando seguimento à análise da metodologia do IPCC, é relevante alertar para algumas considerações e críticas no tocante a sua utilização para hidrelétricas, especialmente aquelas localizadas na região amazônica, conforme salienta Fearnside (2015). De acordo com o referido Autor, o IPCC ainda estaria com poucas informações para inferir a absorção de carbono pelas hidrelétricas - e conseqüentemente incluir essa previsão em sua metodologia -, o que leva a desconsiderar as emissões reais CO_{2eq} por hidrelétricas em zonas tropicais, sendo um exemplo dessa prática o fato do IPCC não fornecer valores padrões para emissões de hidrelétricas através da degaseificação (*degassing*) nas turbinas, de ebulição (bolhas) da superfície do reservatório e de ebulição e difusão no rio à jusante da barragem (IPCC, 2006, Vol. 4, Apêndice 3). Ademais, de acordo com este Autor reportar as emissões de turbinas e vertedouros é opcional e a maioria dos países também tem ignorado essas emissões.

As emissões da degaseificação já foram ressaltadas no trabalho de Mendonça *et al.* (2012) que afirma que medições contínuas por 10 (dez) anos do reservatório *Petit Saut* mostraram que a degaseificação à jusante das turbinas pode representar o principal caminho para as emissões de CH_4 (ABRIL *et al.*, 2005 *apud* MENDONÇA *et al.* 2012).

Logo, outra grande crítica à metodologia anteriormente difundida era a ausência de contabilização das emissões de vertedouros e turbinas (processo chamado de degaseificação - *degassing* em inglês) nos inventários de emissões, ausência essa que Fearnside constatou no primeiro inventário nacional do Brasil de emissões de gases de efeito estufa (BRASIL, 2004 *apud* FEARNSIDE, 2015). Contudo, essa questão já foi sanada e atualmente essa contabilização já vem sendo incorporada nas pesquisas realizadas (BRASIL, 2014).

De fato, a contabilidade deve considerar a degaseificação nas turbinas e vertedouros, de difusão e ebulição na superfície do reservatório e de ebulição e difusão no rio à jusante da barragem, mas deve também considerar a absorção de GEE pela sedimentação, fazendo um balanço final de emissões e absorções. Para Mendonça *et al.* (2012) a superfície do reservatório representa um sumidouro de carbono da atmosfera e a quantidade de GEE presente no fluxo da interface entre água-atmosfera dependerá da solubilidade do gás na água.

Ocorre que, de modo geral, a falta de metodologia para a coleta de dados e estimação das emissões pode levar ao viesamento de valores com a possibilidade de quantificação incompleta de emissões à jusante das turbinas, razão pela qual o Brasil deveria estabelecer uma metodologia de coleta de dados própria a fim de se adiantar frente aos órgãos internacionais, considerando as peculiaridades locais do país.

Sendo assim, a falta de consenso científico sobre as emissões de reservatórios contribui para que esse quadro seja pouco preciso e aparentemente excludente no tocante as hidrelétricas nacionais para fins de representatividade dentro do IPCC.

Em vista das hidrelétricas contarem com fatores naturais para a caracterização de suas emissões, a quantificação dos fluxos de emissão e remoção de GEE deve, então, perpassar pelas características específicas de cada ambiente de instalação hidrelétrica. Não fosse apenas isso, a quantidade de gases fluindo pelos rios tributários também afeta essa quantificação (e.g. LIMA *et al.*, 1998 *apud* MENDONÇA *et al.*, 2012).

Portanto, é evidente que não se pode falar apenas em emissões de GEE pelas hidrelétricas, devendo-se considerar a possibilidade de remoção de gases pelos reservatórios, as características pré-enchimento e também as contribuições de rios tributários e variáveis ambientais.

Nesse contexto, é altamente incipiente a padronização de uma metodologia básica de quantificação de emissões de reservatórios de hidrelétricas e o próprio IPCC admite não haver ainda uma ciência desenvolvida suficientemente para fornecer as devidas respostas a essas e outras questões.

Fearnside (2015) destacou que:

"O IPCC classifica os reservatórios como "áreas úmidas" ("wetlands"), mas uma revisão da seção de áreas úmidas das orientações do IPCC 2006 realizada entre 2011 e 2013 excluiu explicitamente da revisão a parte sobre emissões de reservatórios (IPCC, 2014, p. O.4). Os autores foram instruídos que: "terras alagadas (reservatórios) são especificamente excluídas sendo que a TFI [força tarefa sobre inventários nacionais de gases de efeito estufa] não considera a ciência subjacente a ser suficientemente desenvolvida" (IPCC, 2011, p. 3)".

Com objetivo de auxiliar na quantificação das emissões, em 2006, o IPCC apresentou um novo conjunto de diretrizes com informações de emissões de reservatórios (*default*) em um apêndice de suas normas (Vol. 4, Apêndice 3, p. Ap.3.5) (FEARNSIDE, 2015). De acordo com Fearnside (2015) isso é calculado como o valor mediano de uma série de medições publicadas para diferentes reservatórios. A mediana é usada em vez da média, porque a distribuição de valores é altamente distorcida. O referido Autor ainda complementa esclarecendo que a mediana é frequentemente usada em vez da média como uma forma de minimizar o efeito de valores "*outlier*" (valores fora da faixa esperada) que pode ser o resultado de erros de medição. No entanto, a distribuição desigual dos valores de fluxo de metano não é o resultado de erro de medição, mas sim uma característica do próprio sistema, como temperatura, por exemplo, além de outros fatores ambientais. Na maioria dos dias, a taxa de emissão será modesta, mas menos frequentemente haverá grandes explosões de emissão.

Sobre a escolha dos *tiers*, os *tiers* 2 e 3 devem ser adotados para fins de quantificação das emissões no caso de ambientes naturais como hidrelétricas com reservatórios. Todavia, Fearnside (2015) ressalta que:

"os países podem optar para relatar as emissões de ebulição das superfícies do reservatório no Tier 2, mas as grandes emissões de metano a partir das turbinas são relatadas somente no Tier 3, raramente utilizado ([2], Vol. 4, Apêndice 3). O apêndice sobre reservatórios nas orientações de 2006 ([2] IPCC, 2006, Vol. 4, Apêndice 3) é identificado como uma atualização das orientações de boas práticas, do IPCC ([3], Apêndice 3a.3), mas nem todas as alterações representam adições: a tabela de dados sobre as emissões de ebulição desapareceu ([3], Apêndice 3a.3, p. 3.290, Tabela 2A.3.4 versus [2], Vol. 4, Apêndice 3, p. Ap.3.5, Tabela 2A.2)."

Para a quantificação de emissões dever ser atentado para as emissões líquidas, que necessitam da análise das emissões pré-enchimento e em razão do detalhamento necessário para essa quantificação, o *tier* 3 deveria ser aquele que mais bem atende às necessidades do setor de hidroeletricidade no Brasil, mas ainda há uma falta de dados e informações que comprometem a utilização dessa metodologia mais detalhada.

De acordo com Fearnside (2015) as emissões de hidrelétricas nacionais localizadas em zonas tropicais poderiam estar subestimadas:

"As emissões de hidrelétricas tropicais são subestimadas em inventários nacionais de gases de efeito estufa no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)... As emissões de hidrelétricas tropicais são também em grande parte, deixadas fora do Relatório Especial sobre Fontes Renováveis de Energia e Mitigação das Mudanças Climáticas, do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), e foram excluídas de uma revisão das orientações do IPCC sobre zonas úmidas. O papel das hidrelétricas em inventários de emissões e na mitigação tem sido sistematicamente ignorado".

Assim, para reduzir as incertezas inerentes aos fluxos de GEE em reservatório, de acordo com Mendonça *et al.* (2012), a avaliação do papel líquido dos reservatórios como sumidouros ou fontes de GEE para a atmosfera exige análises como: (i) a mudança líquida no ciclo do carbono, devido à construção do reservatório, (ii) possibilidade de sumidouros de

carbono pré-inundação; (iii) as fontes de carbono do curso do rio original e a paisagem terrestre adjacente (TEODORU *et al.*, 2011); e (iv) o efeito líquido do reservatório como coletor de carbono atmosférico (ST LOUIS *et al.*, 2000; BARROS *et al.*, 2011).

Como se observa, existe razoável incerteza, além de insegurança metodológica, na quantificação das emissões que farão parte dos inventários (bancos de dados) que subsidiarão os cálculos de ciclo de vida e/ou pegada de carbono de hidrelétricas, especialmente aquelas com reservatórios.

As problemáticas descritas acima motivaram a Associação Internacional de Hidroeletricidade (IHA) buscar respostas e elaborar um Projeto de Pesquisa em 2008 denominado UNESCO/IHA GHG *Status of Water Water Reservoirs - UNESCO/IHA GHG* em colaboração com o Programa Hidrológico Internacional (IHP) da UNESCO, visando: (i) melhorar a compreensão do impacto dos reservatórios nas emissões naturais de GEE; (ii) obter uma melhor compreensão dos processos envolvidos e (iii) ajudar a superar lacunas de conhecimento (UNESCO/IHA, 2008).

Cabe ressaltar que os objetivos e os planos do Projeto foram definidos em dois Workshops científicos organizados pela UNESCO (em 2006, em Paris, França; e em 2007, em Foz do Iguaçu, Brasil) como parte do programa de trabalho IHP-VI 2002-2007 da UNESCO. Esses eventos foram seguidos por uma reunião em Paris, em janeiro de 2008, que finalizou o documento de estado-da-arte "*Scoping Paper: Assessment of the GHG Status of Freshwater Reservoirs*". O Projeto seguiu uma abordagem científica baseada em consenso, com cobertura internacional intensiva, envolvendo a colaboração de inúmeras instituições. Para tanto, todos os produtos produzidos são analisados por um grupo de revisão por pares do Projeto (Fórum UNESCO/IHA), composto por pesquisadores, cientistas e profissionais de mais de 100 instituições.

Os principais objetivos estabelecidos no Projeto UNESCO/IHA GHG são:

- (i) Desenvolver diretrizes para medições líquidas de GEE em reservatórios de hidrelétricos;
- (ii) Promover medidas cientificamente rigorosas e cálculos das emissões líquidas (as mudanças nas emissões de GEE devido à construção de um reservatório hidrelétrico) de um conjunto representativo de reservatórios hidrelétricos;
- (iii) Desenvolver ferramentas de modelagem preditiva para avaliar as emissões de GEE de reservatórios não monitorados e novos locais potenciais para instalação de reservatórios;
- (iv) Desenvolver diretrizes e ferramentas de avaliação para mitigação das emissões de GEE em locais vulneráveis.

Como consequência foi produzido em 2009 o documento *Measurement Specification Guidance for Evaluating the GHG Status of Man-Made Freshwater Reservoirs* (UNESCO/IHA, 2009a) cujo objetivo foi estabelecer diretrizes para medições de GEE visando uma abordagem internacional e medidas objetivas para facilitar a comparação, transferência e uso global de dados. Contudo, foi identificada a necessidade de instrumentos práticos adequados para uso em campo e capaz de fazer medições diretas de emissão, e dois novos documentos foram desenvolvidos:

Manual de Campo: instruções objetivas e claras sobre os métodos de campo e equipamentos necessários para estimar as emissões de gases com efeito de estufa, em condições pré e pós-alagamento, permitindo que técnicos qualificados e cientistas realizem medições de emissão de GEE no campo (UNESCO/IHA, 2010);

Manual de Cálculos: procedimentos padrões sobre como calcular as emissões líquidas de GEE resultantes da criação de um reservatório em uma bacia hidrográfica, a serem utilizados com taxas de emissão de GEE medidas e calculadas a partir de medições de campo, obtidas como indicado no *Field Manual* (UNESCO/IHA, 2009b).

De acordo com UNESCO/IHA (2010b) espera-se que futuramente o Manual de Cálculos seja aplicável em todo o mundo, para todos os climas e para reservatórios de todos os tipos e propósitos, e sob diferentes condições de reservatório, pois cada um destes ambientes a ser analisado requer várias etapas na análise de dados. A Figura 6 ilustra este processo, incluindo a verificação da adequação dos dados disponíveis e a possível necessidade de redesenhar a resolução espacial e temporal dos pontos de medições campo e de laboratório:

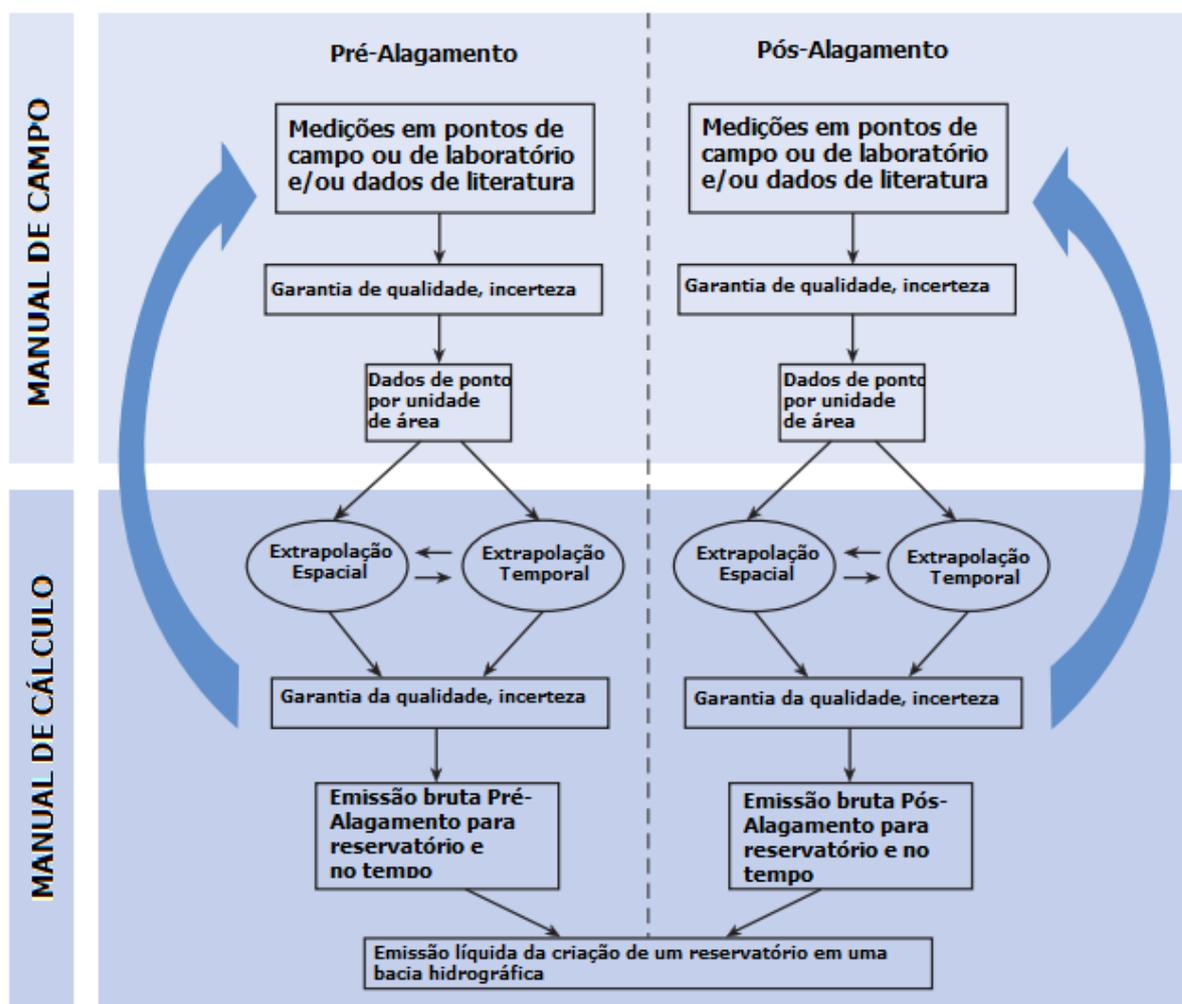


Figura 6: Esquema geral para análise de dados conforme a metodologia da UNESCO/IHA. Fonte: Adaptado de UNESCO/IHA (2010b).

Segundo UNESCO/IHA (2010b) as Diretrizes estabelecidas não seriam um método geral para avaliação e monitoramento de rotina em reservatórios existentes e futuros. Em vez disso, elas propõem um método padrão para facilitar a comparação e transferência de dados de campo coletados detalhados através de estudos de pesquisa abrangentes sobre reservatórios e bacias hidrográficas, observando todos os processos subjacentes e suas relações significativas. Com isso, é esperado desenvolver modelos de modelagem preditiva que possam substituir as necessidades intensivas de monitoramento, pois se aplicariam aos reservatórios em geral e, portanto, reduziria a necessidade de realizar as devidas avaliações mostradas na Figura 6.

Além disso, foi ressaltado pela UNESCO/IHA que os volumes acima citados e outros compreenderão um conjunto de documentos, que será conhecido como Guia de Medição e

tais documentos estarão inter-relacionados, porém, cada um deles será um documento autônomo como segue:

- *Measurement Guidance – Volume 1: Executive Summary;*
- *Measurement Guidance – Volume 2: Main Concepts and Description of Processes;*
- *Measurement Guidance – Volume 3: Field Manual (Field Protocols and estimation of fluxes per unit area);*
- *Measurement Guidance – Volume 4: Calculation Manual (Elements for net emission calculation);*
- *Measurement Guidance – Volume 5: Appendices (Scoping Paper, Background and Approach, Glossary).*

Assim sendo, nota-se que o que foi proposto pela UNESCO/IHA é uma excelente iniciativa e quando todos os documentos estiverem prontos serão bastantes úteis principalmente para pesquisadores, especialistas em GEE, qualidade da água, desenvolvedores de projetos, proprietários/operadores de reservatórios e reguladores governamentais, entre outros.

Adicionalmente, no ano de 2012, a Agência Internacional de Energia (IEA), através do Grupo de Trabalho denominado *IEA Hydropower Implementing Agreement (IEA Hydro)*, que é composto por vários membros do Brasil, Japão, Finlândia, Noruega e EUA, elaborou e publicou Diretrizes para análise quantificação de emissões líquidas de GEE de Reservatórios para identificar as melhores práticas para ajudar os usuários a obter um quadro de referência para a análise quantitativa das emissões líquidas de GEE de reservatórios artificiais. Ao todo são dois volumes, a qual o Volume 1 aborda programas de medição e análise de dados e o Volume 2 a modelagem (IEA, 2012).

Seguindo a mesma linha exposta acima, o Brasil realizou pesquisa importante para equacionar algumas das questões anteriormente citadas em relação as incertezas e conhecimentos inerentes as emissões de GEE de reservatórios hidrelétricos. Nestes estudos foram realizadas campanhas pré-enchimento e/ou pós-enchimento dos seguintes empreendimentos hidrelétricos: Belo Monte, Santo Antônio, Batalha, Balbina, Funil, Itaipu, Serra da Mesa, Segredo, Três Marias, Tucuruí e Xingó, cujos dados foram publicados em 2014 através do Projeto BALCAR (BRASIL, 2014).

No contexto da realização do Projeto BALCAR, que será detalhado a seguir, a incerteza envolvendo a quantificação das emissões de GEE de reservatórios artificiais teve destaque. Isso porque as metodologias internacionalmente aceitas para estimação de inventários nacionais de emissões e remoções antropogênicas de GEE, no caso de avaliação de CO₂ e CH₄ de áreas inundadas (IPCC, 2006, apêndices 2 e 3), fornecem apenas bases para desenvolvimentos metodológicos futuros, refletindo a limitação da informação científica disponível no tema (BRASIL, 2014).

5.5.5 O Projeto P&D brasileiro de quantificação de emissões de usinas hidrelétricas

Em atendimento ao Projeto Estratégico "Monitoramento de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios de Usinas Hidrelétricas" foi encaminhado para a ANEEL em junho de 2009 pela ELETRONORTE, como empresa proponente, FURNAS e CHESF, como empresas cooperadas, um projeto de P&D denominado Projeto BALCAR. Participaram do Projeto como empresas executoras as seguintes instituições de pesquisa brasileiras: CEPEL, COPPE/UFRJ, INPE, UFJF, LACEN, UFPA, UFPR e IIEGA (BRASIL, 2014).

Nas palavras do ex-Ministro de Minas e Energia Edison Lobão (BRASIL, 2014):

"esta publicação se insere no contexto das políticas nacionais e medidas específicas dirigidas ao aproveitamento racional das fontes de energia, visando à efetivação dos objetivos da Política Energética Nacional, entre os quais se destacam preservar o interesse nacional, promover o desenvolvimento, ampliar o mercado de trabalho, valorizar os recursos energéticos e fomentar a pesquisa e o desenvolvimento relacionados à energia renovável, em consonância com as diretrizes do Conselho Nacional de Política Energética - CNPE".

O Projeto (BRASIL, 2014) foi centrado nos seguintes objetivos:

- I. Estabelecer diretrizes para métodos de amostragem (espacial e temporal), de coleta e preservação de amostras, análises físico-químicas e biológicas, análises dos dados e avaliações dos resultados em estudos de emissões de gases de efeito estufa em reservatórios de hidrelétricas, levando em conta os diferentes tipos, tamanhos, idades e localizações de reservatórios no Brasil;
- II. Realizar campanhas de campo para coleta de dados em um conjunto de oito reservatórios de aproveitamentos em operação (Tucuruí, Balbina, Serra da Mesa, Segredo e Itaipu) e três áreas de futuros reservatórios de aproveitamentos em fase de construção (Santo Antônio, Belo Monte, e Batalha).

Assim, o Projeto BALCAR (BRASIL, 2014) procurou estabelecer uma abordagem metodológica própria para o contexto nacional. Para tanto, foram realizadas 44 campanhas de medições de fluxos de GEE e variáveis relacionadas em oito aproveitamentos hidrelétricos em operação e em três em construção no Brasil, distribuídos ao longo dos diferentes biomas no território brasileiro, usando diversos métodos e técnicas.

Analisando o referido documento podem ser destacadas as principais conclusões classificadas por temas intrínsecos, conforme abaixo:

- Limnologia e Metabolismo Planctônico: Nos corpos e cursos d'água estudados ocorreram variabilidade espacial e temporal dos principais parâmetros limnológicos explicados por 10 (dez) variáveis, destacando-se a temperatura e a transparência da água, do pH e fósforo total. Ademais, se verificou que os reservatórios tendem a ser uma grande entrada de matéria orgânica proveniente da bacia, apontando para a persistência da heterotrofia (pela respiração bacteriana) nesses sistemas;
- Concentração de Gases e Fluxos Difusivos nos Sedimentos: Grande parte do CH₄ produzido nos sedimentos não chega a interface água-ar, resultante do processo de oxidação de CH₄ (metanotrofia) na coluna de água. No caso do CO₂ os fluxos foram, em geral, menores ou equivalentes na interface sedimento-água em comparação com fluxos na interface água-ar, o que evidencia processos de produção de CO₂ na coluna de água tanto por respiração como por oxidação de CH₄. Além disso, os reservatórios mais recentes exibiram valores mais elevados em relação aos reservatórios mais antigos, principalmente em função do processo de estabilização do reservatório após o envelhecimento;

- Fluxos e Intensidades de GEE para Reservatórios em Operação: Ressaltou-se a importância do processo de sedimentação permanente de carbono nos reservatórios estudados;
- Vias de troca de GEE Pós-Enchimento para os Reservatórios em Operação: Nos fluxos difusivos originados pela superfície dos reservatórios notou-se padrões de ordenamento diferentes conforme o gás analisado. Sobre os fluxos ebulitivos de CO₂ na superfície dos reservatórios observou-se que os valores destes fluxos foram bastante próximos para a maioria dos aproveitamentos hidrelétricos. Em relação aos fluxos difusivos de CO₂ à jusante observou-se que os valores diferiram significativamente entre si, sendo que a ordem obtida não se mostrou associada ao tamanho do reservatório ou à sua latitude;
- Intensidade de GEE Pós-Enchimento: Foram observadas emissões pós-enchimento por unidade de energia produzida inferiores às emissões por termoelétricas, com exceção para o reservatório de Balbina;
- Emissões Pré-Enchimento: Em vista da dificuldade, em razão das incertezas, de definir o balanço de fluxos de CO₂ para áreas naturais e florestadas, foram considerados três cenários anteriores à implantação do empreendimento (Neutro, Emissão e Remoção). Ao se comparar os balanços de emissões e remoções pré-enchimento nos diferentes cenários observou-se que para os aproveitamentos com ocorrência de floresta ou matas na área inundada, encontraram-se balanços negativos no cenário Remoção. Já nos cenários Floresta Neutra e Floresta Emissão os resultados dos balanços foram positivos para todos os aproveitamentos, e nesse cenário o tamanho da área do reservatório foi determinante para a ordenação dos balanços. No que se refere às emissões líquidas, para o cenário Remoção nos aproveitamentos de Balbina, Tucuruí, Itaipu e Segredo estas suplantaram as emissões pré-enchimento. Para o Cenário Floresta Neutra e Floresta Remoção as menores emissões líquidas ocorreram em Funil e Xingó.
- Intensidade de GEE Líquidas: Tanto as intensidades de GEE líquidas calculadas, quanto àquelas pós-enchimento se mostraram consideravelmente inferiores às emissões por termoelétricas, com exceção para Balbina, que devido a sua extensa área inundada e baixa capacidade de geração, foram observados elevados valores para intensidade de GEE nos cenários Remoção e Neutro, e compara-se a uma térmica à carvão no cenário Emissão.

Não fossem apenas as referidas conclusões que contribuíram significativamente para o conhecimento de emissões de hidrelétricas, é importante também destacar neste Projeto os cálculos de Emissões Líquidas para os empreendimentos em operação analisados: Balbina, Funil, Itaipu, Segredo, Serra da Mesa, Três Marias, Tucuruí e Xingó. Adicionalmente, também foram incluídos estudos comparativos usando os cenários com Floresta Remoção, Neutra e Emissão.

Com objetivo de exemplificar e trazer elementos relevantes para que se possa ter noção da importância desse tipo de pesquisa, apresentamos a seguir valores dos balanços de emissões líquidas de carbono de vários empreendimentos hidrelétricos (UHE) brasileiros usando os cenários Floresta Remoção (a), Neutra (b) e Emissão (c), que foram obtidos do projeto BALCAR (Tabela 1).

Tabela 1: Balanço de emissões líquidas de carbono de empreendimentos hidrelétricos (UHE) brasileiros usando os cenários Floresta Remoção (a), Neutra (b) e Emissão (c).

(a) CENÁRIO FLORESTA REMOÇÃO (toneladas de CO_{2eq})			
UHE	Pós-enchimento (tCO_{2eq}/dia)	Pré-enchimento (tCO_{2eq}/dia)	Emissões Líquidas (tCO_{2eq}/dia)
Balbina	5.672,35	-1.504,43	7.176,78
Funil	6,33	10,25	-3,92
Itaipu	645,12	-141,40	786,51
Segredo	26,86	-39,63	66,48
Serra da Mesa	1.111,91	595,91	516,00
Três Marias	521,82	236,99	284,83
Tucuruí	4.839,43	-368,56	5.207,99
Xingó	-27,82	0,81	-28,62

(b) CENÁRIO FLORESTA NEUTRA (toneladas de CO_{2eq})			
UHE	Pós-enchimento (tCO_{2eq}/dia)	Pré-enchimento (tCO_{2eq}/dia)	Emissões Líquidas (tCO_{2eq}/dia)
Balbina	5.672,35	449,07	5.223,28
Funil	6,33	10,25	-3,92
Itaipu	645,12	258,68	386,43
Segredo	26,86	2,36	24,49
Serra da Mesa	1.111,91	595,91	516,00
Três Marias	521,82	236,99	284,83
Tucuruí	4.839,43	1.462,13	3.377,30
Xingó	-27,82	0,81	-28,62

(c) CENÁRIO FLORESTA EMISSÃO (toneladas de CO_{2eq})			
UHE	Pós-enchimento (tCO_{2eq}/dia)	Pré-enchimento (tCO_{2eq}/dia)	Emissões Líquidas (tCO_{2eq}/dia)
Balbina	5.672,35	3.302,85	2.369,51
Funil	6,33	10,25	-3,92
Itaipu	645,12	845,11	-199,99
Segredo	26,86	63,91	-37,05
Serra da Mesa	1.111,91	595,91	516,00
Três Marias	521,82	236,99	284,83
Tucuruí	4.839,43	4.136,51	702,92
Xingó	-27,82	0,81	-28,62

Fonte: Adaptado de BRASIL (2014).

Além disso, foram realizados cálculos comparativos das emissões líquidas de intensidade de GEE entre os empreendimentos hidrelétricos, para os cenários considerados, e termelétricas a gás natural e carvão (Figuras 7, 8 e 9).

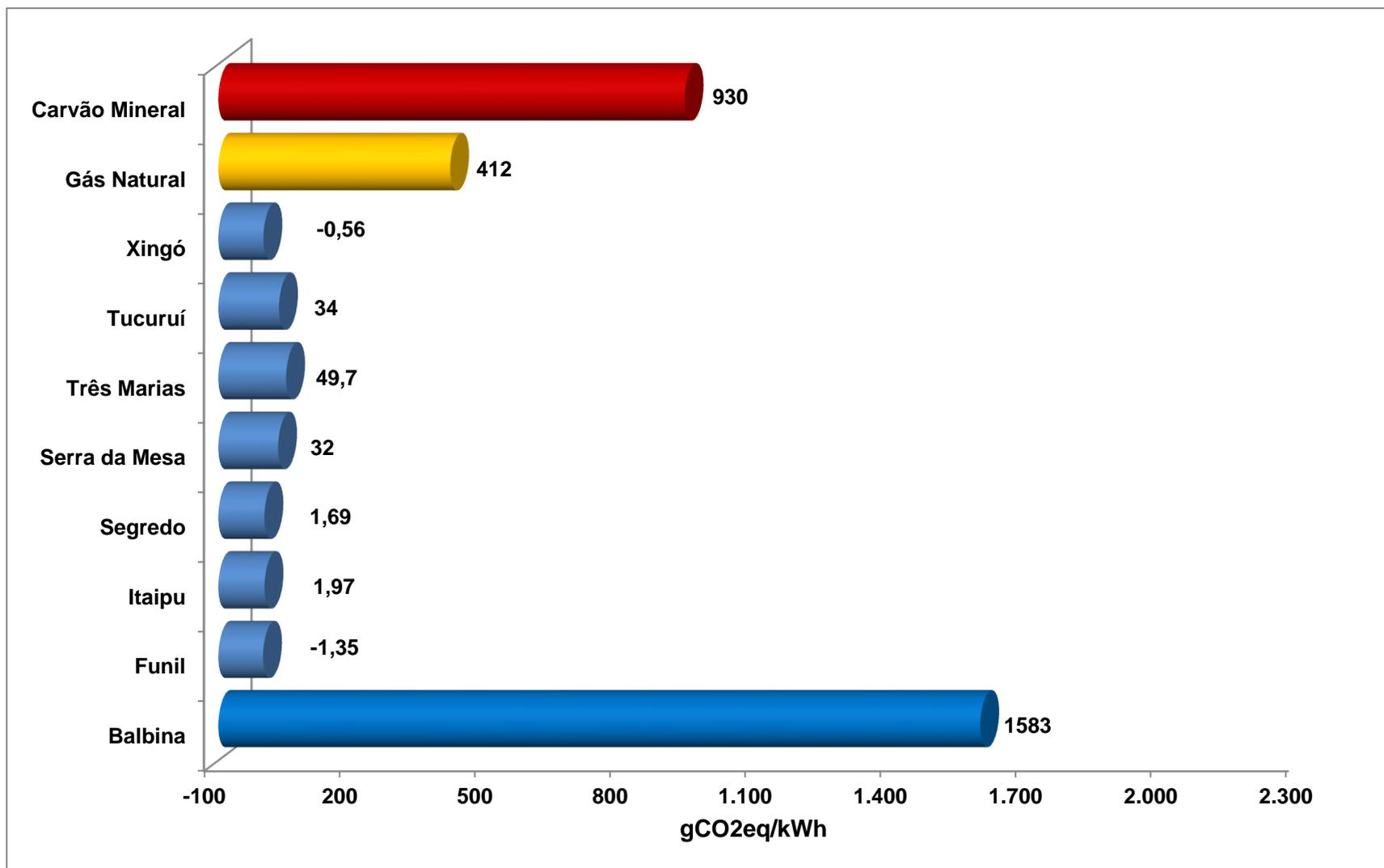


Figura 7: Comparação de Intensidades de Emissões Líquidas de GEE dos empreendimentos hidrelétricos no cenário Floresta Remoção com termelétricas a carvão ou gás natural. Fonte: Adaptado de BRASIL (2014).

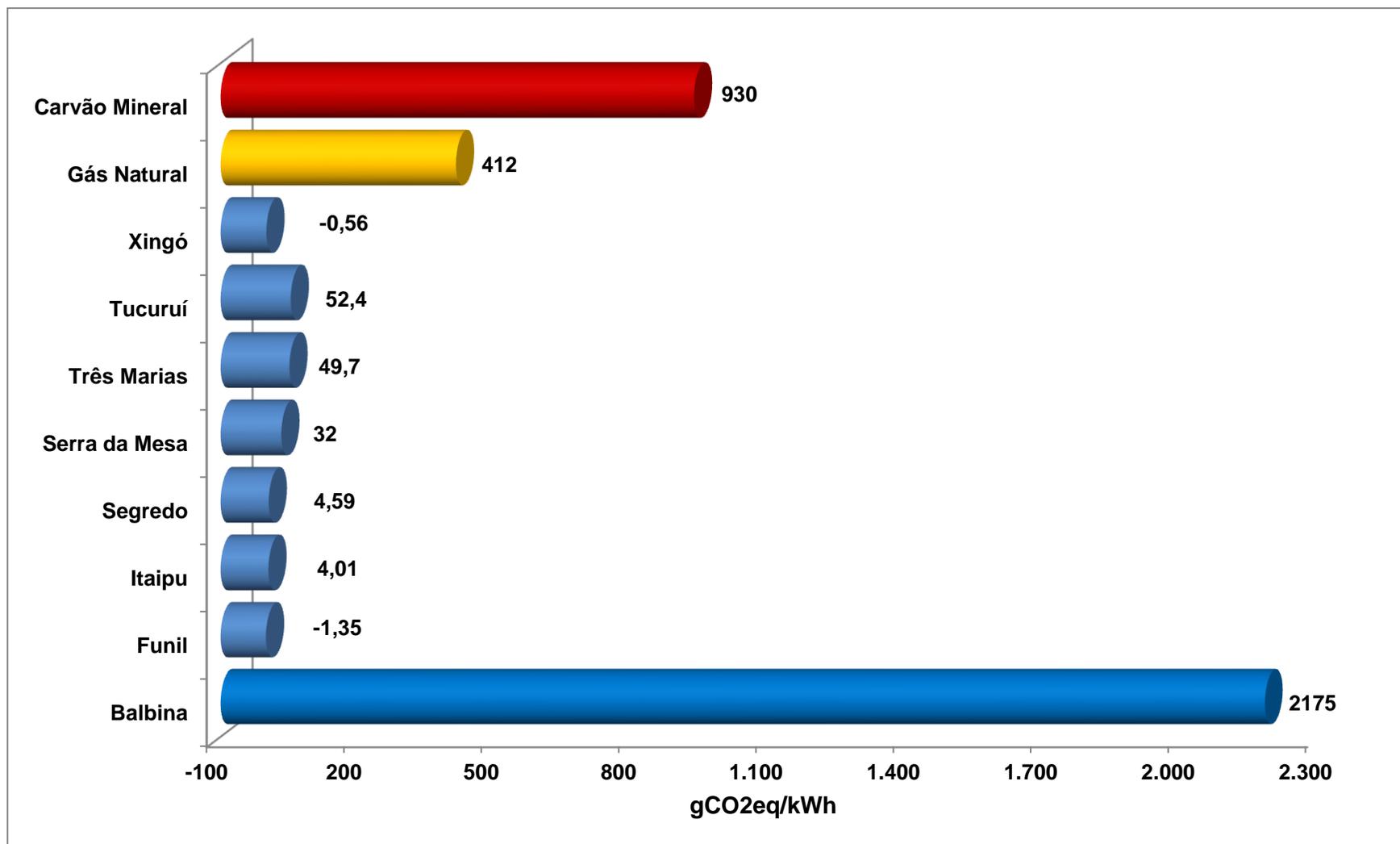


Figura 8. Comparação de Intensidades de Emissões Líquidas de GEE dos empreendimentos hidrelétricos no cenário Floresta Neutra com termelétricas a carvão ou gás natural. Fonte: Adaptado de BRASIL (2014).

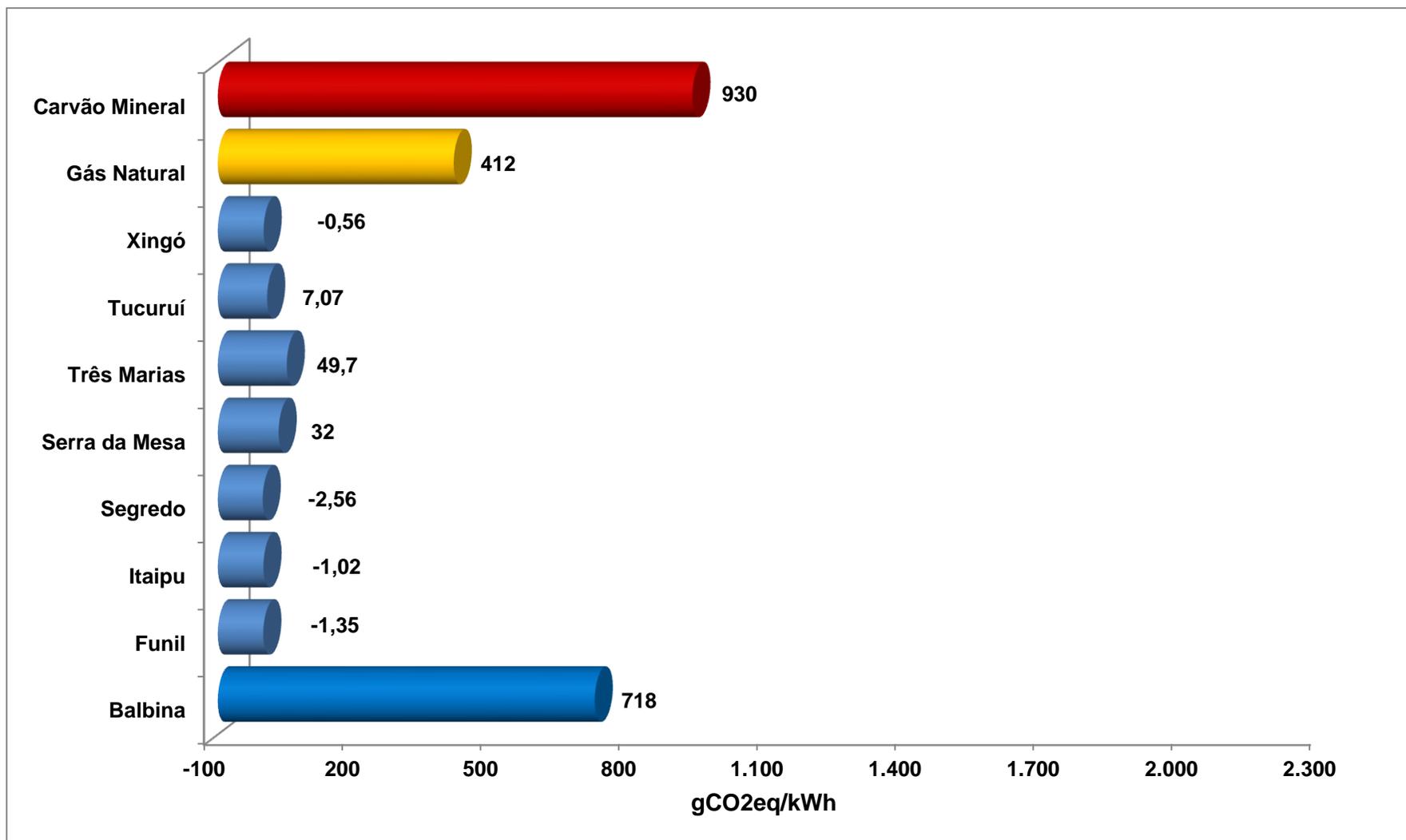


Figura 9. Comparação de Intensidades de Emissões Líquidas de GEE dos empreendimentos hidrelétricos no cenário Floresta Emissão com termelétricas a carvão ou gás natural. Fonte: Adaptado de BRASIL (2014).

Com efeito, é relevante observar que, com exceção de Balbina, os valores de intensidade de GEE dos empreendimentos são bastante inferiores às outras fontes apresentadas nos gráficos acima. Essa assertiva demonstra indícios de que as fontes hidrelétricas são eficientes em termos de capacidade de geração e menos agressivas em termos de emissões de GEE do que as termelétricas comparadas.

Portanto, note-se que a metodologia elaborada pelo Projeto BALCAR foi direcionada ao contexto brasileiro e ainda permitiu a elaboração de cenários comparativos entre fontes de geração de energia, agregando maior conhecimento para a tomada de decisões. Consequentemente, foi uma contribuição importante a produção do documento denominado “Diretrizes para Análises Quantitativas de Emissões Líquidas de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios, Volume 1 - Programas de Medição e Análise de Dados”, contendo recomendações e procedimentos para a execução de medições de campo e análise de dados (CEPEL/ELETRONBRAS/MME, 2012). Esse documento poderá contribuir substancialmente para conhecimento das emissões do setor hidrelétrico, bem como, deveria ser utilizado como proposta de um modelo para o estabelecimento de uma metodologia nacional, pois contou com diversas campanhas de campo que consideraram as limitações tecnológicas e físicas do sistema e ainda abordou fatores peculiares da realidade brasileira no contexto de emissões de reservatórios.

Em razão da aparente bem-sucedida proposta do Projeto mencionado, deveria haver a continuidade na elaboração de estudos como esse, em especial com simulações de impactos futuros para novos empreendimentos ainda não instalados. Sendo assim, ampliar o conhecimento no tocante aos potenciais impactos reais de um empreendimento poderá reduzir a participação política e econômica na tomada de decisões.

Ademais, através da ampliação de estudos como esse para demais empreendimentos hidrelétricos, inclusive para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's), seria possível gerir de forma mais eficiente as emissões do setor, contribuindo para uma possível redução de emissões de GEE e melhoramento da tecnologia utilizada.

De acordo com UNESCO/IHA (2010b) uma consequência resultante da controvérsia existente sobre as emissões de GEE dos reservatórios hidrelétricos é que os projetos de energia hidroelétrica com reservatórios estão sendo submetidos a uma metodologia conservadora de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O limite estabelecido é uma densidade de potência inferior a 4 W/m^2 , o que exclui efetivamente os empreendimentos de energia hidroelétrica com importantes reservatórios hidrelétricos. Isso ocorre porque o Comitê Executivo da UNFCCC observou que, com as incertezas científicas atuais, critérios simples baseados em um limite em termos de densidade de potência (capacidade de geração de energia instalada dividida pela área de superfície inundada), estão sendo usados para determinar a elegibilidade de usinas hidrelétricas para apoiar projetos de MDL. A decisão foi tomada como medida preventiva, enquanto não se tenham informações mais fidedignas das emissões de GEE associadas a tais reservatórios na literatura científica.

Isto é apenas um exemplo da clara necessidade de se estabelecer uma metodologia padrão para estimar as emissões dos reservatórios, o que permitiria uma avaliação mais correta de empreendimentos hidrelétricos e possibilitaria projetos de reservatórios com baixas emissões líquidas de GEE para se qualificarem para o MDL.

5.6 Exigências Legais referentes aos Relatórios dos Fluxos de GEE em Hidrelétricas com Reservatórios

O Brasil, conforme já salientado, assumiu metas ambiciosas de redução de suas emissões através das Leis 12.187/09 e Portaria MMA 150/16. Todavia, ainda não há nacionalmente uma imposição legal federal para a realização de inventários de GEE de hidrelétricas, especialmente em se tratando de usinas hidrelétricas com reservatórios - em que pese as possíveis iniciativas de órgãos ambientais para a realização de inventários de emissão como parte integrante de um eventual processo de licenciamento.

Ocorre que a gestão de informações, no caso, a gestão das emissões depende, inexoravelmente, do levantamento de dados acurados. Portanto, é preciso conhecer as reais emissões, para então geri-las. Não havendo inventário de emissões do ciclo de vida de todas as fontes, inclusive as renováveis, não se permite comparar o *custo x benefício* de empreendimento.

No caso de hidrelétricas, o custo para se operacionalizar a coleta dos dados e medições é alto, visto a não uniformidade do território nacional em termos principalmente de vegetação e clima, bem como a necessidade de medição de fluxos de emissão em diversos pontos de um mesmo empreendimento. Não fosse apenas isso, ainda não existe um consenso sobre a metodologia a ser utilizada na quantificação de emissões de reservatórios nacionais, elevando as incertezas encontradas nos inventários produzidos com dados generalistas.

Assim, inexistindo estímulos financeiros ou setoriais para a realização de inventários com dados nacionais, será difícil especialmente em um contexto de crise econômica e política, em que a realização de campanhas de medição de emissões faça parte das prioridades governamentais. Ademais, o conhecimento das emissões continuará incipiente sem que as escolhas governamentais sobre os investimentos em energia levem em consideração as emissões reais de cada potencial de produção energética.

No Rio de Janeiro, a Resolução INEA/PRES no 64, de 12 de dezembro de 2012, dispõe sobre a apresentação de inventário de emissões de gases de efeito estufa para fins de licenciamento ambiental no Estado. Essa Resolução reconhece a importância de o Estado conhecer a evolução do quantitativo de gases de efeito estufa emitidos pelas atividades nele exercidas para elaboração de planos e programas de mitigação e adaptação as mudanças climáticas. No entanto, as atividades cuja apresentação do inventário de emissões é obrigatória seriam: aterros sanitários; estações de tratamento de esgotos (ETE's); indústrias petroquímicas, de petróleo, química, de produção de alumínio, de produção de cerâmica, de produção de cimento, de produção de vidro; siderurgia; termelétricas à combustíveis fósseis; e Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN's) - não havendo previsão para pequenas centrais elétricas, por exemplo.

A Resolução citada acima se fundamenta na Lei Estadual do Rio de Janeiro No. 5.690/2010 que instituiu a política estadual sobre mudança global do clima e desenvolvimento sustentável e dá outras providências, e condiciona a emissão de licenças ambientais de instalação e/ou operação à apresentação de inventários de GEE por aqueles empreendimentos com significativa emissão de gases de efeito estufa.

Para hidrelétricas, há uma falta de incentivos à realização de inventário dos fluxos de emissão, quiçá ante a complexidade e incerteza da metodologia de quantificação dos gases de reservatórios. O próprio Programa Brasileiro GHG *Protocol*, por exemplo, até março de 2017 não possuía uma metodologia para contabilizar as emissões decorrentes de mudança do uso da terra, categoria que se inserem os reservatórios de hidrelétricas.

Todavia, uma importante mudança ocorreu em 2017 e as empresas participantes do Programa Brasileiro GHG *Protocol* passarão a contabilizar os fluxos de emissão decorrentes

da mudança no uso do solo no ciclo de 2017, sendo opcional a contabilização para os anos anteriores.

A proposta do Programa Brasileiro GHG *Protocol* mostra que existe um movimento para ampliar a quantificação dessas emissões e remoções de GEE através de *soft law* e pressões do mercado. Todavia, acredita-se que, ainda que se passe a exigir a quantificação das emissões nacionais do setor hidrelétrico, será preciso o estabelecimento de uma padronização metodológica para essa quantificação que considere os fatores naturais brasileiros no volume de GEE reportado.

Em vista do exposto acima, o Brasil deveria estar preocupado em padronizar de acordo com as peculiaridades nacionais seus fluxos de GEE na matriz energética predominante - a hidráulica, isso porque o momento para se investir nessa padronização é enquanto ainda não há uma pressão externa para a utilização de modelos internacionais; os quais, como já visto, não se enquadram perfeitamente nas peculiaridades regionais apresentadas pelo Brasil. Neste contexto, a metodologia elaborada pelo projeto BALCAR (BRASIL, 2014) pode ser utilizada no direcionamento para se estabelecer uma metodologia brasileira.

Essa metodologia seria fundamental não só para a verificação por agentes externos dos dados coletados e dos resultados produzidos por relatórios de pegadas de carbono, mas também para uma possível negociação das empresas concessionárias de produção de energia elétrica para futura amortização dos custos de inventários de GEE decorrentes de sua produção ao longo do contrato de concessão.

Assim, enquanto não houver um consenso metodológico sobre a coleta dos dados e custos para execução, ficará de fora de qualquer negociação a questão dos custos com a realização de inventários dos fluxos de GEE - custos que poderão onerar consideravelmente o concessionário, caso venham a ser exigidos, não são previstos no momento da celebração do contrato de concessão.

Ademais, já foi destacado por trabalho produzido pela FGV que para a matriz energética brasileira ser capaz de suprir a crescente demanda por eletricidade sem abrir mão de seu caráter predominantemente renovável, assegurando um abastecimento elétrico menos suscetível à escassez hídrica, faz-se necessário o direcionamento de recursos e de políticas de incentivo à expansão da oferta de energia gerada por meio de fontes alternativas e renováveis (GVCES, 2015).

A redução das incertezas poderá promover maior segurança técnica sobre os interesses que guiarão a tomada de decisões. Machado *et al.* (2008) acrescentam que a incerteza pode contribuir para que questões ambientais sejam manipuladas por interesses políticos e econômicos fazendo com que os formuladores de política mascarem seus projetos com equivocados critérios técnico-científicos (COSTANZA, 1993 *apud* MACHADO *et al.*, 2008).

Além disso, Machado *et al.* (2008) destacam que a modelagem da sustentabilidade energética do setor elétrico demanda uma visão interdisciplinar para adequar os diferentes conceitos que estão envolvidos na atividade. No caso da hidroeletricidade é bem evidente essa necessária interdisciplinaridade com atuação conjunta de diversas esferas do conhecimento científico para aprimorar as discussões inerentes a esse tema.

6 CONCLUSÕES

- No Brasil a hidroeletricidade por ser um diferencial importante da matriz energética renovável deveria contar com maior estímulo e investimentos no tocante ao gerenciamento de emissões. Atualmente existe razoável incerteza na quantificação de suas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo necessário o aumento do conhecimento sobre os processos que norteiam os fluxos de gases nesses ambientes aquáticos.
- Dentre essas incertezas verificadas, a metodológica referente às emissões de GEE de reservatórios é notória e já foi reconhecida pelo IPCC ao indicar que no momento não se tem certeza se reservatórios são sumidouros ou emissores líquidos de GEE. Um dos aspectos observados foi que os índices de emissões advindos de fontes hidráulicas não são estáveis e podem estar subestimados ou superestimados nos relatórios de emissões nacionais, já que emissões de reservatórios de hidrelétricas não são obrigatoriamente contabilizadas.
- Também foi verificado que a falta de parâmetros específicos para o Brasil implica na utilização elevada de dados fornecidos pelo IPCC, muitas vezes através de valores *default*. Sendo assim, os dados internacionais, como do IPCC, projetados para o Brasil devem ser avaliados com parcimônia, preferindo-se a aferição que considera as singularidades locais e propiciam a quantificação líquida de emissões.
- Por isso, é de suma importância melhorar a quantificação direta, para validar os modelos de cálculo nacionais. Se não for resolvido o fator de cálculo de medição direta, o Brasil vai continuar usando fatores de cálculo incipientes.
- O inventário nacional deve ser composto por informações acuradas ou, ao menos, a aferição mais próxima possível do real, importando na necessidade em se definir uma metodologia nacional adequada para coleta, tratamento e assimilação de dados. Além disso, a base de dados formada pelos inventários de emissões é fundamental para a análise acurada dos relatórios de ciclo de vida e/ou Pegada de Carbono.
- Cabe ressaltar que muito mais do que responder a demandas de partes interessadas, o inventário é um dos primeiros passos para projetos futuros de redução de emissão dentro de uma cadeia de valor, além de preparar a empresa para futuras demandas legais de redução de emissões. Além disso, as empresas que realizam inventários de GEE contribuí significativamente para identificação de oportunidades de redução de custos, assim como para redução da intensidade de carbono de seus produtos e serviços.
- Através de uma metodologia bem estabelecida e um relatório de Pegada de Carbono robusto poderão ser beneficiados os investimentos do setor elétrico relacionados às fontes renováveis de energia elétrica, propiciando maior conhecimento sobre os impactos de emissões e a eficiência da produção de energia. Ou seja, dará suporte quanto ao tipo de investimento a ser realizado, de forma a reduzir as emissões de carbono que têm relação direta com o problema do aquecimento global, atendendo aos anseios de sustentabilidade na produção de energia elétrica, além das metas de redução previstas na Lei 12.187/09 e no Acordo de Paris.

- Neste contexto, ficou evidente que o documento Diretrizes para Análises Quantitativas de Emissões Líquidas de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios - Programas de Medição e Análise de Dados, elaborado pelo Projeto BALCAR, por ser um arcabouço de referência para a execução de análises quantitativas de emissões líquidas de GEE de reservatórios e por conter recomendações e procedimentos para a execução de medições no campo e análise de dados. Adicionalmente devem ser verificadas as diretrizes estabelecidas pela UNESCO/IHA objetivando adaptação as especificidades brasileiras. Com efeito, deve ser analisada a possibilidade de associar essas duas metodologias e com isso contribuir substancialmente para a padronização de uma metodologia nacional com intuito de planejar e gerenciar da melhor forma as práticas sustentáveis durante as fases antes, durante e pós instalação de empreendimentos hidroelétricos.
- No momento do desenvolvimento do planejamento do potencial energético no Brasil deveria haver incentivo para a quantificação de dados, propiciando o amplo conhecimento das consequências da instalação ou ampliação de determinado empreendimento.

Em vista do que foi analisado recomenda-se que a Pegada de Carbono pode ser usada como instrumento de planejamento para atendimento aos objetivos legais do Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima, auxiliando a tomada de decisões de todos os futuros empreendimentos de geração de energia no Brasil, sejam hidrelétricos como também outras fontes de energia (fósseis e renováveis) para evitar problemas de injustiças de cobranças, respondendo assim, a hipótese delineada nesta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação de Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro/RJ.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b. NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação de Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro/RJ.
- ABRIL, G.; GUÉRIN, F.; RICHARD, S. et al., 2005. Carbon Dioxide and Methane Emissions and the Carbon Budget of a 10-year Old Tropical Reservoir (Petit Saut). *Global Biogeochemical Cycles*, v. 19.
- ALBUQUERQUE, L., 2012. Análise crítica das políticas públicas em mudanças climáticas e dos compromissos nacionais de redução de emissão de gases de efeito estufa no Brasil. COPPE. Rio de Janeiro.
- BARROS, N.; COLE, J. J.; TRANVIK, L. J. et al., F. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience* 4: 593-596.
- BRASIL, 1998. DECRETO 2.652/98. Promulga a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, assinada em Nova York, em 9 de maio de 1992. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2652.htm. Acesso em 26/09/2017.
- BRASIL, 2009. LEI Nº 12.187: Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC. Presidência da República, 29/12/2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2009/lei/112187.htm. Acesso em 16/09/2015.
- BRASIL - Ministério de Minas e Energia, 2014. PROJETO BALCAR: *Emissões de Gases de Efeito Estufa e Reservatórios de Centrais Hidrelétricas*. Rio de Janeiro/RJ, CEPEL/ELETOBRÁS/MME, 400 p.
- BRASIL - Empresa de Pesquisa Energética, 2015. Balanço Energético Nacional - Ano Base 2014, 2015. Rio de Janeiro/RJ: Relatório Síntese: EPE/MME. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final%202015%20Web.pdf>. Acesso em 28/10/15.
- BRASIL, 2015. Pegada ecológica. Disponível em: <http://www.pegadaecologica.org.br/2015/index.php>. Acesso em: 31/07/2017.
- BRASIL, 2015. Pegada Hídrica. Disponível em: <http://www.pegadahidrica.org/?page=files/home>. Acesso em: 31/07/2017.
- BRASIL - Empresa de Pesquisa Energética, 2016. Balanço Energético Nacional - Ano Base 2015. Rio de Janeiro/RJ: Relatório Síntese: EPE/MME. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br>. Acesso em 04/05/2017.
- BRASIL, 2016. Resenha Energética Brasileira. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energética+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+\(PDF\)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4;version=1.0](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energética+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+(PDF)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4;version=1.0). Acesso em: 04/05/2017.
- BRASIL - Empresa de Pesquisa Energética, 2017. Site da Empresa de Pesquisa Energética (Ministério de Minas e Energia). Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energética+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+\(PDF\)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4;version=1.0](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energética+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+(PDF)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4;version=1.0). Acesso em 04/05/2017.

- BRASIL, 2017. Convenções das Nações Unidas: Acordo de Paris - INDC (Contribuição Nacionalmente Determinada). Disponível em: <http://www.mma.gov.br/comunicacao/item/10570-indc-contribuicao-nacionalmente-determinada>. Acesso em: 07/03/2017.
- BRASIL, 2017. Programa Brasileiro de GHG Protocol. Disponível em: <http://www.ghgprotocolbrasil.com.br>. Acesso em: 31/07/2017.
- BRASIL, 2017. BEN 2017, ano base 2016. EPE. MME. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf. Acesso em: 06/10/2017.
- CARRINGTON, G, A., 2000. Study of the Lake Chelan Hydroelectric project based on Lifecycle stressor-effects assessment, SCS. Scientific certification systems, Lake Cheelan.
- CEPEL/ELETOBRÁS/MME, 2012. Diretrizes para Análises Quantitativas de Emissões Líquidas de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios - Volume 1 – Programas de Medição e Análise de Dados. Rio de Janeiro/RJ, PROJETO BALCAR, MME, 1ª edição, 95p.
- CHANUDET, V.; DESCLOUX, S.; HARBY, A. *et al.*, 2011. Gross CO₂ and CH₄ emissions from the Nam Ngum and Nam Leuk subtropical reservoirs in Lao PDR. *Sci. Total Environ.* 409, 5382–5391.
- COLE, J. J.; CARACO, N. F., 1998. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆. *Limnol. Oceanogr.*, vol. 43, no. 4, p. 647-656.
- COLE, J. J.; PRAIRIE, Y. T.; CARACO, N. F., 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 10: 171–184.
- COLTRO, L.; GARCIA, E.E.C.; QUEIROZ, G.C., 2003. Life cycle inventory for electric system in Brazil. *Int. J. LCA*, 8(5).
- DELMAS, R.; RICHARD, S.; GUERIN, F. *et al.*, 2005. Long Term Greenhouse Gas Emissions from the Hydroelectric Reservoir of Petit Saut (French Guiana) and Potential Impacts. *Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes. Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*, Publisher: Springer-Verlag, Editors: A. Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm, M. Garneau, pp 293-312.
- DOWNING, J. A.; COLE, J. J.; MIDDELBURG, R. G. *et al.*, 2008. Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 22, GB1018.
- ELKINGTON, J., 2012. Sustentabilidade, canibais com garfo e faca. M. Books do Brasil Editora Ltda: São Paulo.
- EPA - Environmental Protection Agency, 2015. Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles. Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio, USA.
- EPSTEIN, D.; SYKES, J.; CARRIS, J., 2011. Carbon Trust. Oficina de pegada de carbono. Brasília, 9 e 10 de agosto de 2011. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/255/_arquivos/2_o_que_e_pegada_de_carbono_255.pdf. Acesso em: 31/07/2017.
- ESTEVEZ, F. A., 2011. Fundamentos de Limnologia. Editora Interciência: Rio de Janeiro, 826p.
- FEARNSIDE, P. M., 2015. Emissões das hidrelétricas tropicais e o IPCC. pp. 239-258. In: P.M. Fearnside (ed.) *Hidrelétricas na Amazônia: Impactos Ambientais e Sociais na Tomada de Decisões sobre Grandes Obras*. Vol. 2. Editora do INPA, Manaus. 297 pp.
- FEARNSIDE, P. M., 2015. Emissões de hidrelétricas tropicais e o IPCC. Tradução de Fearnside, P.M. *Emissions from tropical hydropower and the IPCC*. *Environmental Science & Policy* 50: 225-239. doi: 10.1016/j.envsci.2015.03.002

- FGV/WRI, 2008. Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol - Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Fundação Getúlio Vargas - Centro de Estudos em Sustentabilidade [FGV/GVces], *World Resources Institute* (WRI), São Paulo, 2ª edição, 76p. Disponível em:
<https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/15413/Especific%C3%A7%C3%B5es%20do%20Programa%20Brasileiro%20GHG%20Protocol.pdf>. Acesso em: 10/08/2017.
- FURNAS – Centrais Elétricas S.A., 2008. O Balanço de Carbono nos Reservatórios de Furnas Centrais Elétricas S.A. Relatório Final, Projeto Balanço de Carbono, Furnas Centrais Elétricas, Rio de Janeiro/RJ, 2008, 304p.
- GAGNON, L.; BELANGER, C.; UCHYAMA, Y., 2002. Life-cycle assessment of electricity generation options: the status of research in year 2001. *Energy Police*, 30.
- GALY-LACAUX, C.; DELMAS R.; KOUADIO G.; RICHARD S.; GOSSE P., 1999. Long term greenhouse gas emission from a hydroelectric reservoir in tropical forest regions. *Global Biogeochem. Cycles* 13: 503-517.
- GILES, J., 2006. Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature* 444(7119): 524-525.
- GUERIN, F.; ABRIL G.; SERÇA D.; DELON C.; RICHARD S.; DELMAS R.; TREMBLAY A.; VARFALVY, L., 2007. Gas transfer velocities of CO₂ and CH₄ in a tropical reservoir and its river downstream, *J. Mar. Syst.* 66: 161-172.
- GVCES, 2015. Aplicação de Indicadores de Intensidade em Instrumentos Econômicos. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas [FGV/EAESP/GVCes], São Paulo, p. 143. Disponível em: <http://mediadrawer.gvces.com.br/publicacoes/original/gvces-relatorio-indicadores-de-intensidade-26-08-2015.pdf>. Acesso em: 31/07/2017.
- IEA - *International Energy Agency*, 2012. Guidelines for Quantitative Analysis of Net GHG Emissions from Reservoirs: Volume 1 – Measurement Programs and Data Analysis. IEA Hydro Annex XII Task 1, October 2012, 80p. Disponível em: http://www.ieahydro.org/media/992f6848/GHG_Guidelines_22October2012_Final.pdf. Acesso em: 10/08/2017.
- IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2012. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Edenhofer *et al.* (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 1075 p.
- ISO - *International Organization for Standardization*. Norma 14.067, 2013. <https://www.iso.org/news/2012/05/Ref1643.html>. Último acesso em 31.07.2017.
- JOHN, V. M.; OLIVEIRA, D. P.; AGOPYAN, V., 2008. Critérios de sustentabilidade para a seleção de materiais e componentes – uma perspectiva de países em desenvolvimento. Escola Politécnica/USP.
- KELLY, C. A.; STALLARD, R. F., 1994. Methane Emissions by Bubbling from Gatun Lake, Panama. *J. Geophys. Res.*, v. 99, pp. 8307-8319.
- KEMENES A., 2006. Estimativa das Emissões de Gases de Efeito Estufa (CO₂ e CH₄) pela Hidrelétrica de Balbina, Amazônia Central, Brasil. (Thesis). Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 95p.
- KEMENES, A.; FORSBERG, B. R.; MELACK, J. M., 2007. Methane release below a tropical hydroelectric dam. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, 12.809-12.814.
- LIMA, I., 2005. Biogeochemical distinction of methane releases from two Amazon hydroreservoirs. *Chemosphere*, 59,1697–1702.

- MACHADO, F. V., 2008. Sustentabilidade energética do setor elétrico: em direção a um modelo de apoio ao planejamento e à tomada de decisão, 06/2008, IV Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade - Mudanças Ambientais Globais: a contribuição da ANPPAS, Vol. 1, pp.1-3, Brasília, DF, Brasil.
- MACHADO, F. V.; SALLES FILHO, S. L. M.; CORDER, S. M.; BOER, D. C., 2008. Research, development and innovation in the electrical energy sector of Brazil: toward a tool for the support of the decision-making process, 06/2008, Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração (EnANPAD), Vol. 1, pp.1-3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MANTOVANI, V. A., 2012. Avaliação do Ciclo de Vida [Online]. Disponível em: <http://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariaAmbienta/SandroD.Mancini/acv-vanessa.pdf>. Acesso em 03/11/2015.
- MARGULIS S.; DUBEUX, C. B. S. Economia da Mudança do Clima: Custos e Oportunidades. MARCOVITCH, J. (Coordenação geral), São Paulo: IBEP Gráfica, 2010. Disponível em: http://www.colit.pr.gov.br/arquivos/File/Publicacoes/Economia_do_clima.pdf. Acesso em: 06/11/2015.
- MENDONÇA, R.; BARROS, N.; VIDAL, L.O.; PACHECO, F.; KOSTEN, S.; ROLAND, F., 2012. Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Reservoirs: What Knowledge Do We Have and What is Lacking?. INTECH Open Access Publisher
- MONICO, J. F. G.; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C., 2009. Acurácia e Precisão: Revendo os Conceitos de Forma Acurada. Bol. Ciênc. Geod., sec. Comunicações, Curitiba, v. 15, no 3, p.469-483, jul-set, 2009.
- OMETTO, J. P.; PACHECO, F. S.; CIMBLERIS, A. C. P. *et al.*, 2011. Carbon dynamic and emissions in Brazilian hydropower reservoirs. p. 155-188. In: E.H. de Alcantara (ed.). Energy Resources: Development, Distribution, and Exploitation. Nova Science Publishers. Hauppauge, New York, E.U.A. 241 p.
- PACCA, S.; HORVATH, A., 2002. Greenhouse Gas Emissions from Building and Operating Electric Power Plants in the upper Colorado River Basin. *Environmental Science & Technology*, N. 14, Vol. 36.
- PIEKARSKI, C. M.; FRANCISCO, A. C.; LUZ, L. M.; BASTIANI, J. A.; ZOCHE, L. Aplicação da ACV na matriz elétrica Brasileira: Uma Análise Multi Cenários em termos de Mudança Climática, Qualidade de Ecossistema, Saúde Humana e Recursos. Disponível em: <http://www.revistaespacios.com/a13v34n04/13340409.html>. Acesso em: 10/11/2015.
- RIBEIRO, C. M.; GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B., 2003. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): Uma Ferramenta importante de Ecologia Industrial. Disponível em: <http://hottopos.com/regeq12/art4.htm>. Acesso em 12/11/2015.
- RIBEIRO, F.M.; DA SILVA, G.A., 2010. Life - Cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production* 18: 44-54.
- ROEHM, C.; TREMBLAY, A., 2006. Role of turbines in the carbon dioxide emissions from two boreal reservoirs, Quebec, Canada. *J. Geophys. Res.*, 111, D24101.
- ROGERIO, J. P.; SANTOS, M. A.; SANTOS, E. O., 2013. Influence of environmental variables on diffusive greenhouse gas fluxes at hydroelectric reservoirs in Brazil. *Braz. J. Biol.*, vol. 73, no. 4, p. 753-764.
- ROLAND, F.; VIDAL, L.O.; PACHECO, F.S.; BARROS, N.O.; ASSIREU, A.; OMETTO J.P.H.B; CIMBLERIS, A.C.P.; COLE, J., 2010. Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs, *Aquatic Sciences*.

- ROSA, L. P.; SANTOS, M. A., 2000. Certainty and Uncertainty in the Science of Greenhouse Gas Emissions from Power-dams – A Report on the State of the Art for the World Commission on Dams, WCD, March 2000, Final Report.
- ROSA, L. P.; SANTOS, M. A.; MATVIENKO, B.; SANTOS, E. O.; SIKAR, E., 2004. Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Reservoirs in Tropical Regions. *Climatic Change*, vol. 66, p. 9-21.
- RUDD, J. W. M.; HARRIS, R.; KELLY, C. A.; HECKY, R.E., 1993. Are Hydroelectric Reservoirs Significant Sources of Greenhouse Gas. *Ambio*, v. 22, W. 246-248.
- SANTOS, E. O., 2006. Contabilização das Emissões Líquidas de Gases de Efeito Estufa de Hidrelétricas: Uma Análise Comparativa entre Ambientes Naturais e Reservatórios Hidrelétricos. COPPE/UFRJ, D.Sc., Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 165 p.
- SANTOS, M. A.; ROSA, L. P.; MATVIENKO, B.; SIKAR, E.; SANTOS, E. O., 2006. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energ. Policy*, vol. 34, p. 481-488.
- SANTOS, M. A.; ROSA, L. P.; MATVIENKO, B.; SANTOS, E. O.; ROCHA, C. D.; SIKAR, E.; SILVA, M. B.; JÚNIOR, M. A. Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. *Oecologia Brasiliensis*, v.12, p.116-129, 2008.
- SANTOS, M. A.; ROSA, L. P.; MATVIENKO, B.; MADDOCK, J. E. L.; SANTOS, E. O. *et al.*, 2013. Emissões de Gases de Efeito Estufa derivadas da UHE São Salvador. Relatório Final, PROJETO PPE 14577 – Tractebel Energia, Fundação COPPETEC/COPPE/UFRJ, 87 p.
- SILVA, E. L.; MENEZES, E. M., 2005. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. 4. ed. rev. atual. – Florianópolis: UFSC, 138p.
- SIKAR, E.; MATVIENKO, B.; SANTOS, M. A. *et al.*, 2009. Tropical reservoirs are bigger carbon sinks than soils. *Verh. Internat. Verein. Limnol*, vol. 30, Part 6, p.838-840.
- STEINHURST, W.; KNIGHT, P.; SCHULTZ, M., 2012. Hydropower Greenhouse Gas Emissions: State of the Research. Synapse Energy Economics, Inc., Cambridge, Massachusetts, E.U.A. 24 p. Disponível em: <http://www.cusli.org/Portals/0/files/conference/2014/Hydropower-GHG-Emissions-Feb.-14-2012.pdf>. Acesso em: 10/11/2015.
- ST LOUIS, V. L.; KELLY, C. A.; DUCHEMIN, E.; RUDD, J. W. M.; ROSENBERG, D. M., 2000. Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate. *Bioscience*, vol. 50, p. 766-775.
- TEODORU, C. R.; PRAIRIE, Y. T.; GIORGIO, P., 2011. Spatial Heterogeneity of Surface CO₂ Fluxes in a Newly Created Eastmain-1 Reservoir in Northern Quebec, Canada. *Ecosystems* 14, Issue 1, 28–46.
- TEODORU, C. R.; BASTIEN, J.; BONNEVILLE, M.-C. *et al.*, 2012. The Net Carbon Footprint of a Newly Created Boreal Hydroelectric Reservoir. *Global Geochemical Cycles*, Vol. 26, Issue 2, GB2016.
- TREMBLAY, A.; VARFALVY, L.; ROEHM, C.; GARNEAU, M., 2004. The issue of greenhouse gases from hydroelectric reservoirs: from boreal to tropical regions. In: *Proceedings of the United Nations Symposium on Hydropower and Sustainable Development, Beijing, China, October 27-29*.
- TREMBLAY, A.; BASTIEN, J.; DEMARTY, M.; DEMERS, C., 2010a. Environmental: Measuring Greenhouse Gas Emissions from a Canadian Reservoir. *Hydro Review*, Volume 29, No. 5, Jan 2010, pages 22-29.
- TREMBLAY, A.; BASTIEN, J.; BONNEVILLE, M. C. *et al.*, 2010b. Net greenhouse emissions at Eastmain 1 reservoir, Quebec, Canada. In: *Proceedings of the 21st World Energy Congress, Montreal, pages 12–16*.

- TREMBLAY, A. Greenhouse Gases: Measuring Net Emissions from Eastmain 1 Reservoir. *Hydro Review*, Volume 30, No. 5, Jan 2011, pages 22-29.
- TOLMASQUIM, M. T., 2016. *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.)*, EPE: Rio de Janeiro.
- UNESCO/IHA, 2008. Scoping Paper: Assessment of the GHG status of freshwater reservoirs. Working Group on Greenhouse Gas Status of Freshwater Reservoirs. International Hydrological Programme, IHP/GHG-WG/3, July 2008, 28p. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001817/181713e.pdf>. Acesso em: 18/09/2017.
- UNESCO/IHA, 2009a. The UNESCO-IHA Measurement Specification Guidance for evaluating the GHG Status of Man-Made Freshwater Reservoirs. IHP/GHG-WG/5, Edition 1, Jun 2009, 57p. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001831/183167e.pdf>. Acesso em: 18/09/2017.
- UNESCO/IHA, 2009b. The UNESCO-IHA Calculation Manual for Evaluating the GHG Status of Man-Made Freshwater Reservoirs. IHP/GHG-WG/5, December 2009.
- UNESCO/IHA, 2010a. The UNESCO/IHA Field Manual for Measuring GHG Emissions to Evaluate the GHG Status of Man-Made Freshwater Reservoirs. UNESCO/IHA GREENHOUSE GAS (GHG) RESEARCH PROJECT, IHP/GHG-WG/7, January 2010, 26p. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001864/186438e.pdf>. Acesso em: 18/09/2017.
- UNESCO/IHA, 2010b. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs. The UNESCO/IHA, Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs Research Project, 154 p. General Editor: Joel A. Goldenfum. Disponível em: <https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/GHG%20Measurement%20Guidelines%20for%20Freshwater%20Reservoirs.pdf>. Acesso em: 18/09/2017.
- UNIÃO EUROPEIA, 2012. Regulamento nº 601/2012 da Comissão Europeia (CE, 2012), Anexos II e III.
- UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015. *Paris Agreement. Intended nationally determined contribution of Brazil*. 21ª Conferência das Partes, Paris/França, Novembro de 2015.
- UTSUMI, M.; NOJIRI, Y; NAKAMURA, T. *et al.*, 1998a. Dynamics of dissolved methane and methane oxidation in a dimictic Lake Nojiri during winter. *Limnology and Oceanography*, 42, 10-17.
- UTSUMI, M.; NOJIRI, Y; NAKAMURA, T. *et al.*, 1998b. Oxidation of dissolved methane in a eutrophic, shallow lake: Lake Kasumigaura, Japan. *Limnology and Oceanography*, 43(3), 471-480.
- VIGON, B. W; TOLLE, D. A.; CORNABY, B. W. *et al.*, 1994. *Lyfe-Cycle Assessment*. Boca Raton, Florida: CRC Press, p.113.
- WEISSER, D., 2007. A guide to life - cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply techs., *Energy*, 32(9), 1543-1559.
- YIN, R. K., 2001. *Estudo de caso – Planejamento e Métodos*. (2ª Ed.). Porto Alegre: Bookman.
- YOKOTE, A.Y., 2003. *Inventário de Ciclo de Vida da Distribuição de Energia Elétrica no Brasil*. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica/USP, 344p.