

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GMA

METODOLOGIA PARA ESTUDOS DE PEGADA DE CARBONO NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

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

RESUMO

Este informe técnico descreve o atual andamento do projeto de pesquisa que tem o objetivo de desenvolver de uma metodologia para a realização de estudos de pegada de carbono que levem em conta análise de ciclo de vida de projetos de geração e transmissão de energia elétrica brasileiros. O projeto prevê, em paralelo ao desenvolvimento metodológico, a realização casos-testes com os seguintes empreendimentos: pequena central hidrelétrica (PCH), linha de transmissão, parque gerador eólico e ciclo de vida do combustível de centrais nucleares. Atualmente o caso teste da PCH está em estágio mais avançado e será usado como exemplo no trabalho.

PALAVRAS-CHAVE

Pegada de Carbono, Mudanças Climáticas, Avaliação de Ciclo de Vida.

1.0 INTRODUÇÃO

A mudança climática é uma das maiores questões ambientais e um grande motivo de preocupação internacional atualmente. Por conta disso as empresas do setor elétrico vêm trabalhando para mitigar, se adaptar e aumentar a resiliência de suas atividades frente à essas novas realidades, buscando também se adequar e atender as demandas impostas pela sociedade e pelo mercado.

Uma dificuldade na avaliação dos impactos das atividades e tecnologias utilizadas pelo setor elétrico é a consideração de todas as etapas do ciclo de vida, que no jargão técnico significa um estudo detalhado que percorre “do berço ao túmulo”. Em especial, no que tange às mudanças climáticas, a principal variável a ser avaliada é a emissão de gases de efeito estufa (GEE).

O estudo específico que atende à esta demanda é denominado Pegada de Carbono com base em avaliação de ciclo de vida (ACV), e sua execução no setor elétrico brasileiro vem se tornando uma demanda cada vez mais frequente, principalmente pelos agentes do mercado e da sociedade. Entretanto, é importante ressaltar que existe muita confusão envolvendo a definição de um estudo de pegada de carbono, que muitas vezes é tratado como um simples levantamento de emissões de uma atividade, mas que neste trabalho este estudo está relacionado a utilização de ACV, sendo assim um estudo complexo, que se não for executado com critério, perde seu propósito original.

Este Informe técnico descreve o andamento de um projeto de pesquisa que se encontra atualmente em desenvolvimento por uma equipe do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) com o objetivo de desenvolver uma metodologia para a realização de estudos de pegada de carbono baseados em ciclo de vida voltados às necessidades específicas do setor elétrico brasileiro. As atividades do projeto de pesquisa se dividem nas seguintes etapas: A etapa 1 consiste na realização de uma revisão bibliográfica da literatura técnica nacional e internacional sobre o estado da arte do tema Pegada de Carbono, com ênfase em aplicações voltadas para produtos e serviços desenvolvidos pelo setor elétrico. Esta etapa já foi concluída e um relatório técnico foi gerado com produto resultante. A etapa 2 consiste no desenvolvimento de metodologia para a adequação das melhores práticas atuais em Pegada de Carbono à realidade das tecnologias utilizadas no Brasil para geração e transmissão de energia. Para testar as abordagens metodológicas serão realizados estudos de caso em empreendimentos das Empresas Eletrobras. Esta segunda etapa encontra-se em andamento, sendo que o desenvolvimento metodológico está sendo feito em paralelo com a execução de casos-teste.

2.0 BASES METODOLÓGICAS

O conceito de Pegada de Carbono é aqui entendido como a quantificação de emissões de GEE ao longo do ciclo de vida de um produto ou serviço, conceito respaldado por documentos de referência como normas ou manuais com amplo reconhecimento internacional. Neste sentido, três documentos podem ser destacados: norma ISO 14040 (1), ISO 14067 (2) e diretrizes do GHG Protocol para contabilização de emissões corporativas com base no ciclo de vida (3). Podemos encontrar em (1) a base para as definições gerais metodológicas de ACV, enquanto (2) e (3) foram utilizados como referências principais na conceituação de Pegada de Carbono adotada neste estudo.

A norma ISO 14040 (1) pode ser considerada um marco importante por trazer as definições de conceitos fundamentais para a realização de um estudo de ACV. Segundo esta fonte, um estudo de ACV é composto por quatro fases: (i) definição de objetivos e escopo; (ii) análise de inventário; (iii) avaliação de impactos e (iv) interpretação. A Figura 1 apresenta a configuração destas quatro fases, onde é possível notar que existem vias de mão dupla entre etapas do estudo, ou seja, as fases anteriores podem ser revistas a qualquer momento antes da conclusão da ACV.



Figura 1 – Fases de um estudo de ACV

Inicialmente, é importante definir a orientação que o estudo deve tomar, sendo este o objeto da primeira etapa. O escopo de uma ACV, incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, depende do objeto e do uso pretendido para o estudo. A profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente, dependendo do objetivo do estudo em particular.

A fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV) é a segunda fase de uma ACV. Trata-se de um inventário dos dados de entrada/saída associados ao sistema em estudo que envolve a coleta dos dados necessários para o alcance dos objetivos propostos.

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase de uma ACV. O objetivo da AICV é prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental.

A interpretação do ciclo de vida é a fase final do procedimento de ACV, na qual os resultados de um ICV e/ou de uma AICV, ou de ambos, são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo (1).

Quando se trata de utilização das técnicas de ACV é preciso observar que uma série de conceitos estão associados a essas técnicas e que para uma boa execução é importante que tais conceitos estejam bem definidos e interpretados corretamente. Nesse sentido a norma ISO 14040 (1) presta um importante serviço apresentando de forma clara e simples uma série de conceitos fundamentais. Dentre as definições mais importantes disponíveis nessa norma pode-se citar:

- Ciclo de vida
estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final.
- Avaliação do ciclo de vida (ACV)
compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.
- Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

fase da avaliação do ciclo de vida envolvendo a compilação e quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida

- Avaliação de impacto do ciclo de vida

fase da avaliação do ciclo de vida que visa ao entendimento e à avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto.

- Unidade funcional

desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência

- Fronteira do sistema

conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto

- Categoria de impacto

classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser associados

- Indicador de categoria de impacto

representação quantificável de uma categoria de impacto.

Considerando as definições acima, e baseado em (2), um estudo de pegada de carbono que leva em conta ciclo de vida pode ser definido como: “soma de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e remoções em um sistema de produto, expressa em CO₂ equivalente e com base em uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), usando a categoria de impacto exclusiva de mudança climática”.

3.0 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Devido à natureza e complexidade de um estudo de ACV, muitas vezes requerendo uma série de informações de fontes e origens diferentes, é comum a aplicação de ferramentas computacionais. Dentre as vantagens da utilização de ferramentas de ACV podem-se destacar a facilidade de modelagem das etapas e processos, realização de cálculos do estudo, além da disponibilidade de bancos de dados de inventário de ciclo de vida (ICV) e métodos de avaliação de impactos de ciclo de vida (AICV) geralmente incluídos nos pacotes. Este capítulo apresenta uma análise geral das ferramentas disponíveis no mercado com destaque para a exposição dos softwares SimaPro e GaBi.

Um sistema que realiza ACV deve conter: (i) uma base de dados central com todos os inventários e metodologias de avaliação de impacto ambiental; (ii) um método de cálculo para auxiliar os conjuntos de dados obtidos pelas instituições; (iii) um editor para criar, alterar e apagar um conjunto de dados; e (iv) um auxiliar na análise dos dados.

Os bancos de dados de apoio à ferramenta ACV são constituídos por diversas bases de dados que contém informações ambientais sobre a produção de bens e disponibilidade de recursos. Os bancos de dados estão inseridos nos softwares que auxiliam a ACV sendo constituídos por inventários de ciclo de vida de elementos comuns a vários ciclos de vida como materiais, energia, transporte etc.

Esses conjuntos de dados possuem características de cada região, por exemplo, pode-se citar o BUWAL 250, que possui foco em materiais de embalagem da região de Suíça, o Canadian Raw Materials Database, em matérias primas da região do Canadá e a LCAFood em produtos alimentícios da Dinamarca. Um dos conjuntos de dados mais amplo existentes no mercado é o Ecoinvent.

O IBICT (Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia) mantém o Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida (SICV Brasil), criado para abrigar inventários de ciclo de vida de produtos nacionais, de dimensões ainda modestas. A ferramenta tem como missão manter e assegurar o acesso aos dados de inventários de produtos e processos da indústria brasileira, bem como validar as informações a serem inseridas.

Além de banco de dados, encontram-se acoplados aos softwares de ACV ferramentas de avaliação dos impactos ambientais (AICV). Métodos para AICV são modelos de caracterização e cada método apresenta um conjunto de categorias de impacto específicas. A versão 9 do Simapro divide os métodos disponíveis para cálculo de impacto em seis categorias: European, Global, North American, Single issue, Superseded e Water footprint.

4.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item foram destacados alguns estudos de cálculo de pegada de carbono que usam metodologia ACV aplicados ao setor elétrico ou a tipos de empreendimentos específicos do setor, a saber: "Adoption of Photovoltaic Systems Along a Sure Path: A Life-Cycle Assessment (LCA) Study Applied to the Analysis of GHG Emission Impacts", (4); "Carbon footprint scenarios for renewable electricity in Australia", (5) e "Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain", (6).

Em (4) podemos encontrar uma avaliação do impacto, em termos de emissões de GEE, ao longo do ciclo de vida, da introdução de plantas fotovoltaicas em países com alta participação renovável na matriz elétrica. Foram utilizados dados de geração anual de 10 plantas fotovoltaicas instaladas no nordeste brasileiro, totalizando 1,1 MWp, medidos durante 2 anos. Também foram utilizados dados de literatura para estimar a energia gasta na produção e instalação das plantas, a degradação do sistema ao longo do tempo e para converter a energia em emissões de GEE. Para a avaliação foram calculados dois indicadores principais: (i) Energy payback time, em anos, que corresponde ao tempo de operação necessário para se gerar a quantidade de energia gasta na fabricação, instalação, operação e descomissionamento do equipamento; e (ii) Intensidade de emissões correspondente a todo o ciclo de vida, em gCO₂e/kWh.

Considerando a fabricação na China, os Energy payback time obtidos variaram entre 2,90 e 5,16 anos entre as plantas enquanto as intensidades de emissões atingiram entre 58,38 e 81,02 gCO₂e/kWh. A intensidade de emissão média das 10 placas foi maior que a média do SIN projetada para 2020, o que significa que as emissões do SIN evitadas durante o ciclo de vida das plantas não compensaram as emissões totais geradas pelas plantas. As fases de fabricação e instalação das plantas fotovoltaicas corresponderam, em média, a 84% das emissões totais.

As incertezas e a variabilidade dos dados de entrada e das projeções para as emissões da matriz elétrica futura foram apresentadas como as principais lacunas do estudo, sendo amenizadas por um procedimento de análise de sensibilidade para os valores de energia de produção das plantas, de tempo de vida do sistema, da energia gerada pelo sistema e da taxa de emissão da matriz elétrica do país de fabricação. Também foram adicionados cenários em que as fabricações das plantas ocorreram no Brasil e no Canadá. Em uma suposta cadeia produtiva integralmente brasileira, o estudo estimou que as intensidades de emissões poderiam reduzir em até 75% devido aos baixos fatores de emissão da matriz, ficando em um patamar bem abaixo do SIN.

Em (5) foi realizada uma avaliação sobre quais seriam as emissões indiretas de GEE remanescentes associadas ao fornecimento de energia elétrica da Austrália caso 100% da geração fosse de fontes livre de carbono. Além disso, foi avaliado quanto o impacto desta redução de emissões contribuiria para a meta de redução de 80% em 2050.

Para fazer esta avaliação, através de uma ACV consequential (CLCA), o estudo incorporou os efeitos da mudança na demanda de energia e na matriz elétrica australiana sobre a pegada de carbono de um conjunto de fontes renováveis do país, em 4 cenários distintos para 2050. Para as estimativas das pegadas de carbono foi utilizada uma metodologia de ACV híbrida (IO-based hLCA) composta por uma combinação entre um método top-down baseado em uma análise de input/output (IOA) e um método bottom-up baseado na análise de processos (PA). Segundo os autores, a hLCA possui a vantagem de preservar a acurácia dos processos principais e aumentar a cobertura de processos mais à montantes.

No cálculo pela hLCA, o consumo de eletricidade em todos os processos de todos os setores ao longo do ciclo de vida das fontes representou uma quantidade significativa das respectivas pegadas de carbono, variando de 32% (CSP) a 62% (HP) das emissões totais. Esse resultado foi justificado pela alta intensidade de carbono da matriz elétrica australiana e indica que a inserção das fontes renováveis poderia reduzir consideravelmente as pegadas de carbono das próprias fontes.

Analisando os resultados, os autores constataram que as emissões diretas da geração apresentaram valores maiores que as pegadas associadas ao consumo final de eletricidade devido à alocação de parte das emissões em outros setores que consomem a eletricidade como produto intermediário. Além disso, também foi verificado que as quedas nos valores das pegadas foram menores que as emissões diretas devido à incorporação das emissões provenientes de outros setores que mantiveram suas emissões constantes nos cenários criados.

Considerando todos os setores da economia, o melhor dos cenários apresentou uma redução de 19% nas emissões australianas, o que demonstrou que a inserção massiva de renováveis na matriz elétrica, sem a descarbonização de outros setores não seria suficiente para alcançar os compromissos de 2050 assumidos pelo país.

Em (6) foi realizado um estudo para fornecer uma estimativa preliminar da pegada de carbono da rede de transmissão de energia elétrica na Grã-Bretanha, mantendo constante o grid de geração. O estudo teve uma abordagem do berço ao túmulo em que foram consideradas as etapas de extração e produção de matérias-primas, transporte e instalação das estruturas, operação e manutenção dos ativos e os respectivos descomissionamentos. O indicador final apresentado foi a intensidade de emissões ao longo do ciclo de vida, em gCO₂e/kWh.

Segundo (6), em 2010 a rede de transmissão da Grã-Bretanha era integralmente operada pela National Grid e transmitia cerca de 350 TWh por ano, produzidos em sua maior parte por geradores a combustível fóssil. Apresentava um total de 22.670 km de linhas aéreas, 822 km de cabos enterrados ou em túneis, 681 subestações e 1.145 transformadores divididos entre as voltagens de 400, 275 e 132 kV. A infraestrutura de geração e distribuição assim como as interconexões submarinas com a França e a Irlanda do Norte foram excluídas da análise.

Para as estimativas, foi considerada uma tecnologia padronizada britânica para a produção, montagem e manutenção, sendo esta estática ao longo do tempo nos 40 anos de vida útil dos ativos. Também foram mantidas constantes as emissões da matriz elétrica de geração. Foram utilizados dados publicados no GB Seven Year Statement 2008 e, para os materiais e a produção, dados do Inventory of Carbon and Energy da University of Bath e para a produção de SF₆ (Campbell & McCulloch, 1998).

Para a construção foi considerado principalmente o combustível utilizado pelas empreiteiras envolvidas. O total de energia e emissão estimados foi de 4,6 PJ e 0,32MtCO₂, respectivamente. Na operação e manutenção, levando em conta os 40 anos de vida útil, as perdas de eletricidade e a fuga de SF₆ corresponderam, respectivamente, a 87% e 12% das emissões de CO₂ equivalentes. Representando menos de 0,5% das emissões desta etapa, também foi incorporado ao cálculo os combustíveis utilizados para inspeções aéreas e terrestres dos ativos, além de uma taxa de renovação dos equipamentos de 10% ao longo da vida útil. Ao total da etapa de operação e manutenção, foram estimados 2672 PJ e 145MtCO₂e de consumo de energia e emissão, respectivamente.

O descomissionamento consistiu na avaliação em relação ao desmonte dos ativos, reciclagem e disposição dos resíduos. O percentual de energia e emissões economizados pela reciclagem de metais em relação a utilização do material novo foi considerada conservadora pelo estudo e aplicado apenas nos metais das linhas aéreas (alumínio - 90%, cobre - 70% e aço - 50%). A energia e as emissões associadas à restauração e ao transporte para reciclagem e disposição foram consideradas equivalentes às de construção dos ativos e representaram uma parcela muito pequena comparada à economia na reciclagem.

A pegada de carbono da etapa de operação e manutenção correspondeu a 96% do total, sendo as perdas de eletricidade a responsável por 85% da pegada, considerando os fatores de emissão da matriz elétrica local. Em termos de intensidade da pegada de carbono, foi estimado um total de 10,6 gCO₂e/kWh ao longo do ciclo de vida da rede de transmissão da Grã-Bretanha. Em uma análise de sensibilidade dos resultados o estudo ainda verificou que os fatores de emissão da matriz elétrica e o total de energia transmitida pela rede mantidos constantes ao longo do tempo foram os únicos pressupostos que apresentaram sensibilidade significativa para os resultados encontrados.

5.0 ESTUDO DE CASO

Este item apresenta a descrição geral das etapas percorridas até o momento em relação a elaboração do estudo de caso para um estudo de pegada de carbono com base no ciclo de vida em uma pequena central hidrelétrica (PCH) em implantação no Brasil. Vale ressaltar que este estudo de caso, assim como as definições metodológicas resultantes ainda estão em desenvolvimento, mas avanços importantes nesse estudo já foram realizados.

A primeira fase a ser desenvolvida neste tipo de estudo é a definição de objetivos e escopo. Nesta etapa se define três marcos importantes: (i) o que? (aplicação pretendida); (ii) por quê (justificativa); (iii) para quem? (público alvo). Os resultados das definições realizadas no estudo de caso podem ser vistos na figura 2. Note que ao definir como aplicação pretendida a quantificação de emissões totais do aproveitamento hidrelétrico este montante de emissões se refere ao montante total compreendido pela soma das emissões de todas as fases do ciclo de vida.

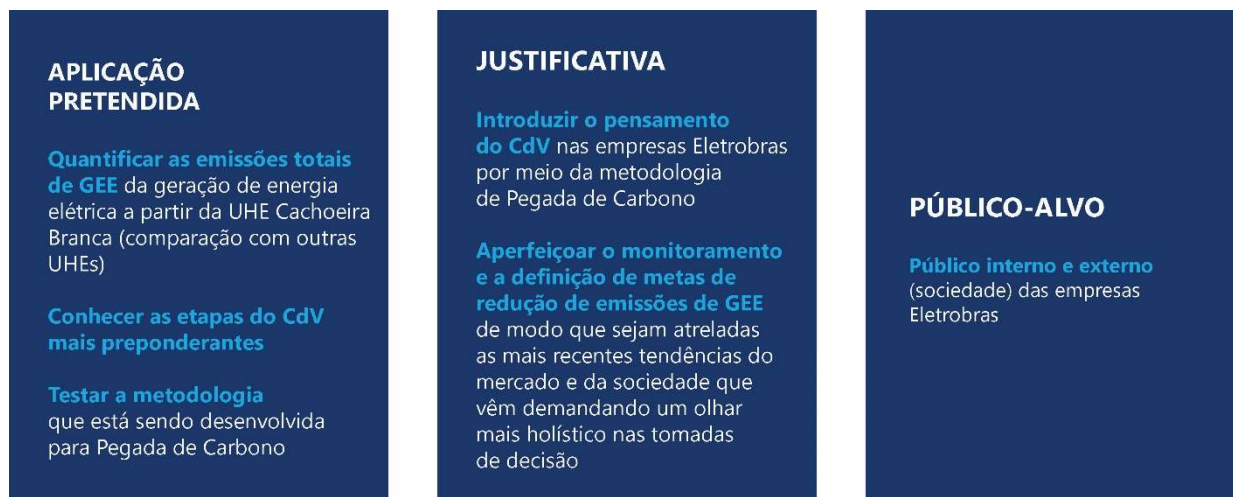


Figura 2 - Etapa de Definição de Objetivos e Escopo do estudo de Caso

As fases do ciclo de vida de um estudo de pegada de carbono de fontes de geração de energia elétrica podem ser descritas pelos fluxos apresentados na figura 3, onde a sequência de etapas horizontal se caracteriza pelo ciclo de vida das instalações físicas da planta de geração de energia (extração de materiais, construção, operação e descomissionamento), enquanto o ciclo vertical se caracteriza pelo ciclo de vida do combustível utilizado para a geração de energia. Entretanto, quando se trata de fontes renováveis, como o caso da geração hidrelétrica, podemos desconsiderar o fluxo vertical e trabalhar somente com as etapas horizontais.

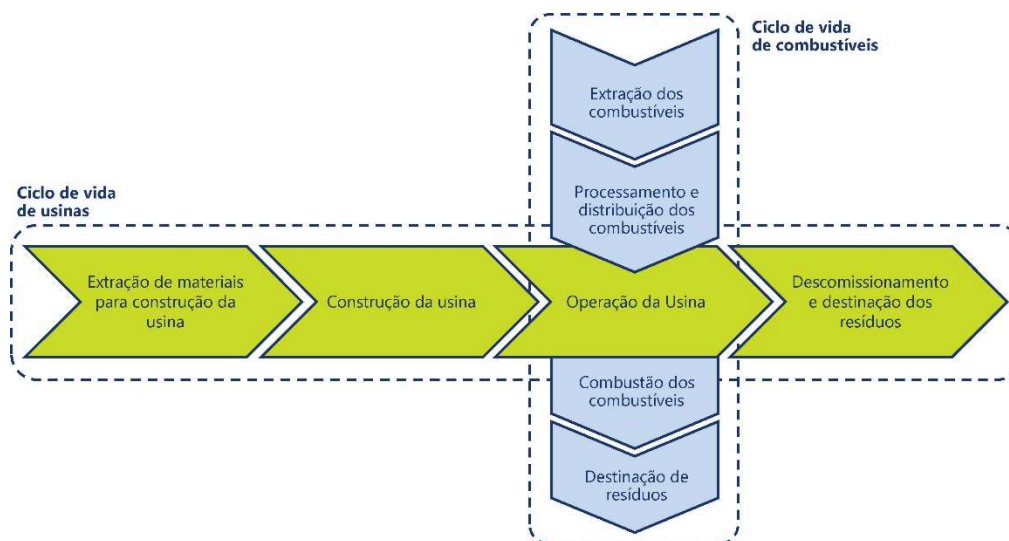


Figura 3. Fases do Ciclo de Vida

A unidade funcional selecionada para este estudo foi definida como sendo 1 kWh de energia elétrica gerada. Uma unidade funcional simples e definida como o fornecimento de uma unidade de eletricidade gerada é muitas vezes apropriada e utilizada em estudos de caso. A adoção desta unidade funcional permite que o estudo seja comparável com outros estudos de pegada de carbono de empreendimentos de geração de energia elétrica no Brasil considerando ACV, desde que os mesmos adotem premissas semelhantes e considerem as mesmas etapas de ciclo de vida.

A segunda fase do estudo consiste no Inventário de Ciclo de Vida, onde a cadeia de fontes emissora é identificada e os limites do sistema são definidos. A figura 4 ilustra a modelagem realizada nesta etapa, onde foram selecionadas todas as entradas e saídas. A fronteira do sistema pode ser vista pela linha tracejada que circunda a figura. Nota-se que as atividades de transmissão e consumo de energia elétrica estão do lado de fora desta linha e portanto, não fazem parte do estudo. Ao contrário da figura 4, onde vemos uma sequência linear das etapas, aqui a etapa de extração de matérias primas e produção de materiais não se conecta somente com a construção da usina, mas com

a fase de operação também. Este avanço em relação ao modelo simples da figura 4 se deu na medida em que a equipe se desdobrou no detalhamento da modelagem de ciclo de vida.

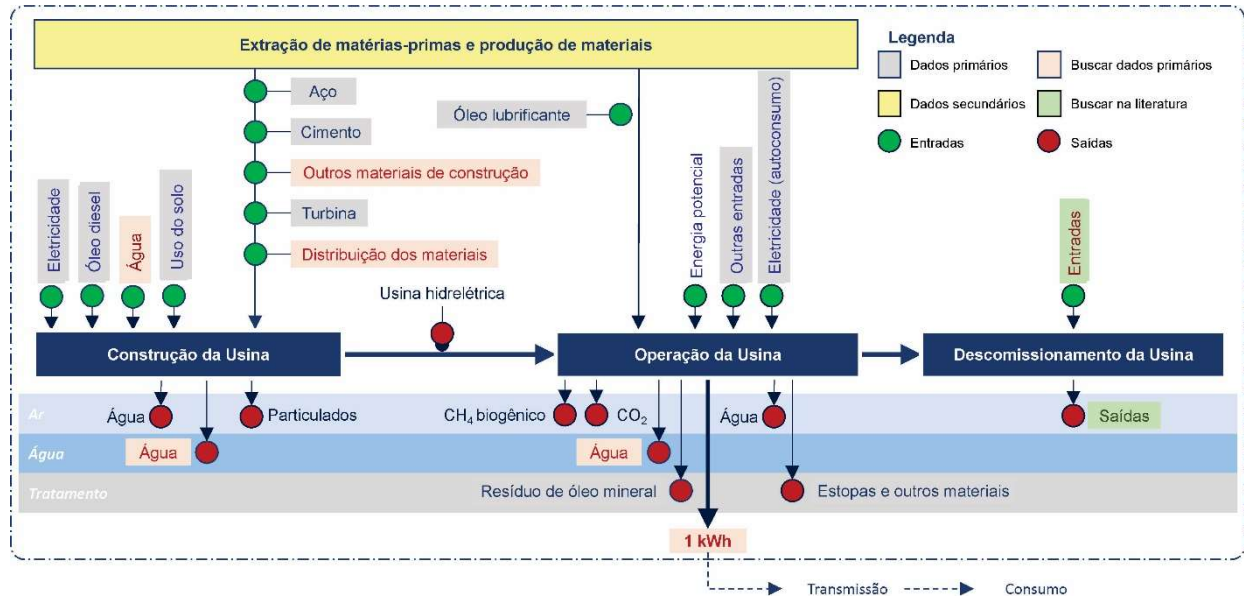


Figura 4. Modelagem e definição de Fronteiras do Sistema

As próximas etapas previstas para o estudo de caso são: (i) a avaliação de impactos de ciclo de vida; e (ii) interpretação do ciclo de vida. Nestas etapas serão calculados os valores de emissões de gases de efeito estufa em termos absolutos (tCO₂e) e relativizados pela unidade funcional do estudo (tCO₂e/ MWh), além da análise dos resultados que deve proporcionar uma visão holística dos resultados.

As expectativas, considerando os valores encontrados na literatura durante a fase de revisão bibliográfica apontam para uma preponderância das emissões da fase de construção da usina, em especial, os impactos relacionados ao uso do solo, ou seja, as emissões decorrentes da decomposição de biomassa submersa quando ocorre o enchimento do reservatório. Entretanto, como este caso teste se trata de uma PCH de pequeno porte com um reservatório pequeno, talvez os resultados possam ser diferentes.

6.0 CONCLUSÕES

Dentre os principais resultados obtidos com a revisão bibliográfica realizada pode-se verificar a pouca quantidade de estudos de Pegada de Carbono realizados no Brasil que adotam efetivamente a abordagem de ACV, e em particular para o setor elétrico, este tipo de estudo é mais raro. Desta forma, confirma-se o ineditismo do desenvolvimento metodológico proposto pelo projeto, ressaltando a necessidade de adaptação das experiências encontradas no cenário internacional para a realidade do setor elétrico brasileiro e suas características peculiares.

Em aplicação para fontes renováveis de geração de energia elétrica, foram encontrados valores bem distintos de pegada de carbono para cada método, fato atribuído principalmente à alta intensidade de carbono da matriz elétrica associada aos estudos de caso. Assim, verificou-se a hipótese de que apesar de serem normalmente vistas como “limpas”, suas cadeias produtivas podem estar atreladas a emissões significativas de GEE. Isso corrobora a necessidade de se empregar métodos baseados na abordagem de ciclo de vida para avaliar tais fontes uma vez que a maior parte dos seus impactos ambientais não está concentrada na etapa de geração de energia, mas distribuída ao longo de suas cadeias produtivas.

Foi verificada significativa diferenciação de resultados de contabilização de emissões de GEE para fontes de geração do setor elétrico quando levada em conta somente a fase de operação, em contraste com estudos de pegada de carbono. Essa diferenciação fica mais evidente nos exemplos da fonte solar quando são consideradas as emissões das etapas de extração de matéria prima e fabricação dos módulos fotovoltaicos. No Brasil, foi identificado em um estudo que as emissões do SIN evitadas pela geração de algumas placas solares não compensariam as emissões totais estimadas pela pegada de carbono quando tais equipamentos eram fabricados na china, onde a matriz elétrica

é bastante intensiva em carbono. Dessa forma, fontes de geração de energia antes consideradas limpas começam a apresentar uma configuração diferente dependendo da abordagem e amplitude do estudo realizado.

Em termos da rede de transmissão, a contabilização da pegada de carbono demonstrou que as perdas de energia correspondem à maior quantidade das emissões embutidas, seguida pela fuga de Hexafluoreto de Enxofre (SF_6) dos equipamentos. Esta última podendo ganhar maior relevância quanto menos emissor for o parque gerador associado.

Vale ressaltar que muitos estudos utilizam uma análise de sensibilidade, um instrumento importante previsto nas normas de ACV. Tal instrumento tem se apresentado como um procedimento útil para indicação das incertezas dos resultados dos estudos. Entretanto, os estudos indicam ainda existir outras incertezas não incorporadas por estas análises.

Além disso, a análise da literatura técnica indicou uma lacuna com relação a estudos de pegada de carbono sobre sistemas energéticos mais modernos e complexos, tais como sistemas híbridos compostos por usinas fotovoltaicas flutuantes e hidrelétricas. Tal fato indica um espaço para o desenvolvimento de estudos pegada de carbono de modo a explorar o desempenho desses sistemas com relação as emissões de GEE.

5.0 REFERÊNCIAS

- (1) ABNT. (21 de 07 de 2014). ABNT NBR ISO 14040. Norma Brasileira, 21. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT.
- (2) ABNT. (9 de setembro de 2015). ABNT ISO TS 14067 - Gases de Efeito Estufa - Pegada de Carbono de Produtos - Requisitos e Orientações Sobre Quantificação e Comunicação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- (3) World Resources Institute. (2020). Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. Greenhouse Gas Protocol.
- (4) Constantino, G., Freitas, M., Fidelis, N., & Pereira, M. G. (2018). Adoption of Photovoltaic Systems Along a Sure Path: A Life-Cycle Assessment (LCA) Study Applied to the Analysis of GHG Emission Impacts. *Energies*, 11, 28.
- (5) Wolfram, P., Wiedmann, T., & Diesendorf, M. (2016). Carbon footprint scenarios for renewable electricity in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 124, 236-245.
- (6) Harrison, G., Maclean, E., Karamanlis, S., & Ochoa, L. (2010). Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain. *Energy Policy*, 38, 3622-3631. doi:10.1016/j.enpol.2010.02.039
- (7) Campbell, N. J., & McCulloch, A. (1998). The Climate Change Implications of Manufacturing Refrigerants: A Calculation of 'Production' Energy Contents of Some Common Refrigerants. *Trans IChemE*, 76, 239-244.

DADOS BIOGRÁFICOS

(1) ALEXANDRE MOLLICA MEDEIROS

Alexandre Mollica Medeiros é Mestre em Planejamento Energético e Ambiental pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (PPE/COPPE/UFRJ), Bacharel em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Trabalha como pesquisador do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) desde 2002. Possui vasta experiência na área de planejamento energético e ambiental. Desde 2010 é coordenador do Grupo de Trabalho de Estratégia Climática do Comitê de Meio Ambiente das Empresas Eletrobras.



(2) KATIA C GARCIA

Katia Cristina Garcia é Engenheira Química, formada pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, com Pós-Doutorado em Adaptação às Mudanças Climáticas pela Université Grenoble Alpes da França (IEPG-UJF-UPMF), Doutora em Planejamento Energético e Ambiental pela COPPE/UFRJ e Mestre em Engenharia de Produção

pela COPPE/UFRJ, possuindo também MBA em Desenvolvimento Gerencial pela FGV/SP. Pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e Coordenadora do Comitê de Gestão de Sustentabilidade do Centro. Membro do Comitê de Meio Ambiente do Cigré (C3) e representante brasileira no Working Group C3.20.

(3) LUCIANA ROCHA LEAL DA PAZ

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

(4) DENISE FERREIRA DE MATOS

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

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

(5) IGOR PINHEIRO RAUPP

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

(6) JOÃO GABRIEL GONÇALVES DE LASSIO

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

(7) JULIANO LUCAS SOUZA DE ABREU

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