

# Avaliação do Ciclo de Vida da hidrelétrica Pari-Cachoeira

*Life Cycle Assessment of Pari-Cachoeira hydroelectric*

<sup>1</sup>Alantino Alves Cordeiro, <sup>2</sup>Dra. Daniele Kasper, <sup>3</sup>Dr. Ricardo Wilson Aguiar da Cruz

<sup>1</sup>Faculdade Metropolitana de Manaus – FAMETRO; Departamento de Exatas - Bacharelado Engenharia Civil;

<sup>3</sup>Universidade Estadual do Amazonas – UEA; Departamento de Engenharia Mecânica;

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ; Centro de Ciências Biológicas e da Saúde.

{Alantino, Daniele, Ricardo} alantinoalves@gmail.com, kasperdani@yahoo.com.br, rcruz@uea.edu.br

**Resumo.** O objetivo deste trabalho foi avaliar, do ponto de vista ambiental, a central geradora hidrelétrica (CGH) Pari-Cachoeira, instalada no Alto Rio Negro, no Amazonas. O senso comum sugere que CGHs não proporcionam impactos ambientais significativos, mas a escassez de estudos sobre tais empreendimentos figura como grande obstáculo à análise científica da existência e da natureza desses impactos. Com essa lacuna em vista, foi realizada uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) da CGH Pari-Cachoeira com base nos métodos *Cumulative Energy Demand* (CED) e *Cumulative Exergy Demand* (CExD). Foi utilizado o software SimaPro e determinado um horizonte de 20 anos de vida útil da CGH, não considerada a etapa de descomissionamento. Na fase de construção, ambos os métodos identificaram o uso de aço e concreto como as principais fontes de impacto. Na fase operacional, o método CED apontou tanto o óleo lubrificante quanto a operação da central como principais componentes de impacto, ao passo que a avaliação pelo método CExD, cujas categorias de impacto são mais amplas que as do CED, identificou a operação da central como maior responsável pelo impacto. Concluiu-se, portanto, que estudos de ACV em hidrelétricas deveriam priorizar o método CExD, pois este oferece resultados mais precisos.

**Palavras-chave:** ACV, geração de energia, análise de impacto, Amazônia.

**Abstract.** This paper attempts to evaluate, from an environmental point of view, the Pari-Cachoeira hydroelectric generation plant, located in the State of Amazonas (Brazil). Inasmuch as common sense suggests that small hydroelectric generation plants do not provide significant environmental impacts, the scarcity of studies about such ventures poses as a major obstacle to the scientific analysis of the existence and nature of these impacts. With that in mind, we have performed a Life Cycle Assessment (LCA) of CGH Pari-Cachoeira contrasting the Cumulative Energy Demand (CED) and the Cumulative Exergy Demand (CExD) methods. We have used the SimaPro software and established a twenty-year lifespan as our threshold (not including the decommissioning stage). In the plant's construction stage, both methods identified the use of steel and concrete as the main source of impact. In the operational stage, however, the CED method pointed to both the lubricating oil and the operation of the plant as the main sources impact, whereas the CExD method, with wider impact categories than CED, identified mainly the operation of the plant as responsible for the impact. From that, we have concluded that ACV studies in hydroelectric plants should prioritize the CExD method, since it offers more accurate results.

**Key words:** LCA, power generation, impact analysis, Amazon

**InterfacEHS** – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade

Vol. 12 no 2 – Dezembro de 2017, São Paulo: Centro Universitário Senac

ISSN 1980-0894

Portal da revista InterfacEHS: <http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/>

E-mail: [interfacehs@sp.senac.br](mailto:interfacehs@sp.senac.br)

Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição-Não Comercial-Sem Derivações 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 

## 1. Introdução

Há atualmente uma grande preocupação com os impactos das atividades antrópicas. Dentre as atividades potencialmente poluidoras, o setor de geração de energia elétrica merece destaque dada a dualidade entre o potencial poluidor e sua utilização no desenvolvimento econômico de um país. No Brasil, estima-se que 62% da potência instalada sejam provenientes de hidrelétricas (ANEEL, 2016).

As grandes usinas hidrelétricas (UHEs) são as mais conhecidas, tanto por sua elevada capacidade de geração de energia quanto pelos grandes impactos socioeconômicos e ambientais que acarretam, por exemplo, emissão de gases de efeito estufa, incremento na contaminação mercurial do pescado, e perda de espécies, monumentos históricos, recursos pesqueiros e madeireiros (KASPER *et al.*, 2014; KEMENES *et al.*, 2008; FEARNSIDE, 2004; PAIVA, 1983; SANTOS, 1995;). Esses impactos geralmente estão associados à grande área alagada pelo reservatório, à não remoção da vegetação, às mudanças nas características limnológicas do corpo de água e às construções de estruturas robustas para o aproveitamento hidrelétrico.

Aproveitamentos hidrelétricos de menor magnitude, as centrais geradoras hidrelétricas (CGHs), normalmente não estão relacionadas aos mesmos problemas associados às UHEs, visto que não requerem grandes estruturas ou grandes áreas de alagamento (são consideradas usinas a fio d'água). Assim, seus impactos são, em tese, menores, mas são também desconhecidos, devido aos fatos elencados acima. Não obstante esta afirmação ser do senso comum, eis que, é possível observar em inúmeros trabalhos que os impactos identificados em uma CGH são de uma menor magnitude e/ou escala do que os relatados em UHEs. No entanto, mesmo que os impactos em CGHs sejam menores, este tipo de empreendimento é mais numeroso do que das UHEs. Portanto, os impactos cumulativos de CGHs podem ser significativos, inclusive ultrapassando aqueles de UHEs (CASTELLO e MACEDO, 2016). Devido ao menor tamanho das CGHs, a obtenção de licenças está associada a uma legislação mais fraca, e sua operação, associada a menos condicionantes. Há poucos estudos sobre os impactos ambientais das CGHs, o que evidencia a necessidade de desenvolver pesquisas a fim de identificar se projetos de aproveitamentos hidrelétricos desse tipo são viáveis do ponto de vista ambiental.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta para avaliação física de impactos ambientais por meio da compilação e da avaliação de entradas, saídas e potenciais impactos de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (FERREIRA, 2004). Nessa avaliação, são incluídos desde a extração e processamento de matérias-primas, transporte, distribuição, uso, reutilização, manutenção e reciclagem do produto, até a disposição de eventuais resíduos (ABNT, 2009); abordagem conhecida como "do berço à cova". A ACV possibilita a avaliação dos impactos de um produto, processo ou empreendimento em unidades físicas, transcendendo as avaliações meramente qualitativas.

No Brasil, a ACV ainda está em processo de desenvolvimento. Esta análise tem sido utilizada na avaliação da construção civil (CONDEIXA, 2013; LOPES, 2013), na indústria petrolífera (CAMPOS, 2012; CARVALHO, 2008), produção de energia (SOUZA, 2007). Avaliações de hidrelétricas no Brasil utilizando ACV somente foram feitas na grande usina de Itaipu (RIBEIRO, 2003). No entanto, avaliações deste tipo nunca foram realizadas em centrais geradoras hidrelétricas no Brasil apesar da disseminação deste tipo de empreendimento no país.

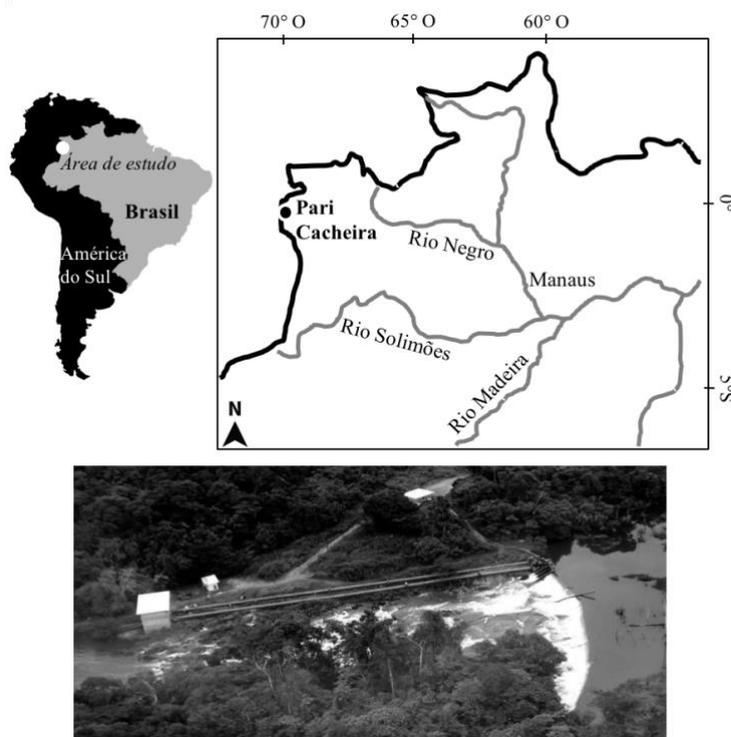
O objetivo do presente trabalho foi avaliar, com a ferramenta ACV, os impactos ambientais relacionados à pequena central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira (CGH Pari-Cachoeira). Com a avaliação das etapas de construção e operação da CGH, objetivou-se inferir quais são as possíveis causas do impacto ambiental do empreendimento no que se refere ao uso de material e energia. Além disso, o

trabalho objetivou comparar dois importantes métodos para ACV, o *Cumulative Energy Demand* (CED) e o *Cumulative Exergy Demand* (CExD), na avaliação de uma hidrelétrica. Estes dois métodos se diferenciam, primeiro, no conceito de exergia resultar da combinação da primeira lei com a segunda lei da Termodinâmica, portanto, internalizando os limites naturais das transformações energéticas; e segundo, porque CExD alcança, além das interações estritamente físicas, as interações químicas em todas as etapas do ciclo de vida, o que o conceito de energia, e, via de consequência, o CED, não o fazem, senão se escrevendo equações de balanço de entropia que contemplem as interações físico-químicas. Portanto, uma análise por CED de um ativo energético que possa impactar fortemente o meio ambiente exige o dobro de graus de liberdade do método CExD. Obviamente, o método CED é mais simples. Em face disso, pode-se postular que, metodologicamente, o método CED permite uma primeira aproximação de figuras dos potenciais impactos de um ativo energético; e o CExD é o método adequado para aprofundamento do acesso a essas figuras. Essa diferenciação fica evidente neste artigo, no que pese analisar uma unidade de pequeno porte.

## 2. Metodologia

### Caracterização da CGH Pari-Cachoeira

A CGH Pari-Cachoeira (Figura 1) é uma hidrelétrica a fio d'água localizada no município de São Gabriel da Cachoeira, no estado do Amazonas, a cerca de 1.200 km de Manaus, na fronteira com a Colômbia. Essa hidrelétrica pertence ao Exército Brasileiro, e é utilizada para o fornecimento de energia elétrica para o Pelotão Especial de Fronteira e para a comunidade local, o que permite visualizar a sua importância estratégica para o exército e social para a comunidade. A hidrelétrica foi formada pelo barramento do rio Tiquié, tem uma potência instalada de 180 kW e entrou em operação em 2011. Este empreendimento possui uma casa de força, que abriga os equipamentos eletromecânicos, dois condutos forçados, que alimentam duas turbinas Francis com rotor duplo de eixo horizontal, uma tomada da água que alimenta os dois condutos forçados, barragem de concreto e um pequeno reservatório de cerca de 2 km<sup>2</sup>.



**Figura 1. Localização da área de estudo (central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira) na América do Sul, no Brasil e no estado do Amazonas (parte superior da figura). Foto área da CGH Pari-Cachoeira cedida pelo Exército Brasileiro (parte inferior da figura).**

Os dados referentes à usina foram obtidos junto ao Exército Brasileiro e à empresa que executou a obra, Work Engenharia Ltda., por meio de projetos, memoriais descritivos, além de entrevistas com engenheiros da empresa. Este estudo de ACV compreendeu quatro fases: (i) definição de objetivo e escopo, (ii) análise de inventário de impacto, (iii) avaliação de impacto, e (iv) interpretação de resultados de acordo com o estabelecido na NBR ISO 14040 da ABNT (2009).

### **Modelagem do sistema de produto**

No presente estudo, foram adotadas as seguintes fronteiras:

- I. Em relação ao sistema natural – captação de água do rio Tiquié e incorporação à usina; consumo de rocha, terra e areia para a construção;
- II. Temporal – devido ao pequeno porte do empreendimento, que implica maior facilidade para ampliações de capacidade e atualizações tecnológicas, e à indisponibilidade de dados referentes a essas possíveis ampliações, foi considerado um horizonte de estudo menor do que os 100 anos normalmente utilizados em estudos de hidrelétricas. Dessa forma, foi utilizado um horizonte de 20 anos de operação da CGH. Tendo em vista o período de construção, de 2009 a 2010, considerou-se como período de operação o intervalo de 2011 a 2031;
- III. Com outros sistemas – os insumos principais utilizados na etapa construtiva e na obtenção dos equipamentos eletromecânicos foram aço, ferro fundido, cobre, cimento e lubrificantes.

### **Inventário de Ciclo de Vida**

Os processos foram feitos segundo o tipo *Unit Process*, que possibilita redes de impactos mais completas (GOEDKOOB *et al.*, 2013). A geração de 1 MWh de energia elétrica foi adotada como fluxo de referência.

Foi desenvolvida uma ACV atribucional com recortes espacial e temporal e com análises sobre a função de gerar energia, conforme o recomendado por RIBEIRO (2003), FERREIRA (2007) e SOUZA *et al.* (2007) para estudos que tenham a produção de energia como função do sistema. O presente estudo considerou as etapas de construção e operação, mas não a desativação do empreendimento, conforme estudos de RIBEIRO (2003) e FERREIRA (2007). Então, optou-se pela não inclusão da etapa de desativação porque no Brasil não há planos que abordem o processo de desativação desses empreendimentos, além do que, estes autores optaram por não propor alguma metodologia, para isso, sem dados que a embase.

A construção e a avaliação do inventário de ciclo de vida (ICV) foram realizadas no software SimaPro 8.0.5.13® (*PRé Sustainability*) (ACV BRASIL, 2016). Foi utilizada a base de dados doecoinvent Centre® (versão ecoinvent v3), disponível no SimaPro, por ser uma ampla biblioteca de inventário com valores de carga ambiental (entradas e saídas de materiais, energia e substâncias), associada ao ciclo de vida de um grande número de produtos, processos e serviços (ACV BRASIL, 2016). Apesar de tal versão possuir um banco de dados secundários que não representa um cenário tipicamente brasileiro, procurou-se adaptar os dados para que ficassem o máximo possível condizentes com a realidade nacional e regional amazônica.

A etapa de construção da CGH possui o maior volume de dados, portanto, para facilitar o levantamento e suas inserções no software, essa etapa foi dividida em seis grupos principais: barragem, casa de forças, tomada da água, conduto forçado, equipamentos eletromecânicos e fornecimento de energia elétrica. A operação foi avaliada em uma única etapa. Posteriormente, a construção e a operação foram

agrupadas em uma única montagem principal para avaliação completa da hidrelétrica.

### **Avaliação de Impactos**

Para a avaliação de impactos foram selecionados métodos que avaliam a central do ponto de vista energético. O significado termodinâmico das entidades energia e exergia têm relação direta com as visões da primeira e segunda leis da Termodinâmica, as quais podem ser sintetizadas em dois postulados (Moran e Shapiro, 2006):

Postulado da energia: a energia, enquanto propriedade extensiva (portanto aditiva) da matéria, se conserva entre quaisquer das transformações a que é submetida. Quando a matéria é submetida a trabalho (W) e calor (Q), ambas energia em trânsito, alteram-se sua energia cinética (K), do movimento, energia potencial (P) do campo gravitacional e, eventualmente, também as formas energéticas associadas como hidráulica (H) e eletromagnética (M). Pode-se postular que a variação da energia total da matéria se conserva, e que, por ser aditiva, pode-se escrevê-la como:

$$\Delta (Q + W + K + P + H + M) = 0$$

Postulado da entropia: as transformações energéticas são, por natureza, entrópicas, i.e., as transformações da energia total não são conservativas. Denomina-se exergia, uma propriedade extensiva (portanto aditiva), à parte da energia que se converte em outra forma útil (a parte que não se converte é chamada de anergia). As várias formas de exergia da matéria são determinadas em relação a um estado padrão, com propriedades padronizadas de temperatura, pressão e concentração química no meio ambiente. Definem-se dois tipos de exergia, as termomecânicas (de naturezas estritamente físicas e associadas às formas de energia acima) e a exergia química (associada às transformações físico-químicas da matéria). Visto que a variação da exergia total não é conservada, é escrita adicionando-lhe a parte destruída nas transformações (D):

$$\Delta (Q + W + K + P + H + M + D) = 0$$

A exergia, portanto, é uma medida mais fiel que a energia para contabilização das transformações a que a matéria é submetida, já que as transformações energéticas não são suscetíveis à entropia. Uma vez que as variações exérgicas tem como referência o meio ambiente, qualquer cômputo de consumo cumulativo de exergia tem caráter utilitarista, ou seja, mede apenas a utilidade real da energia.

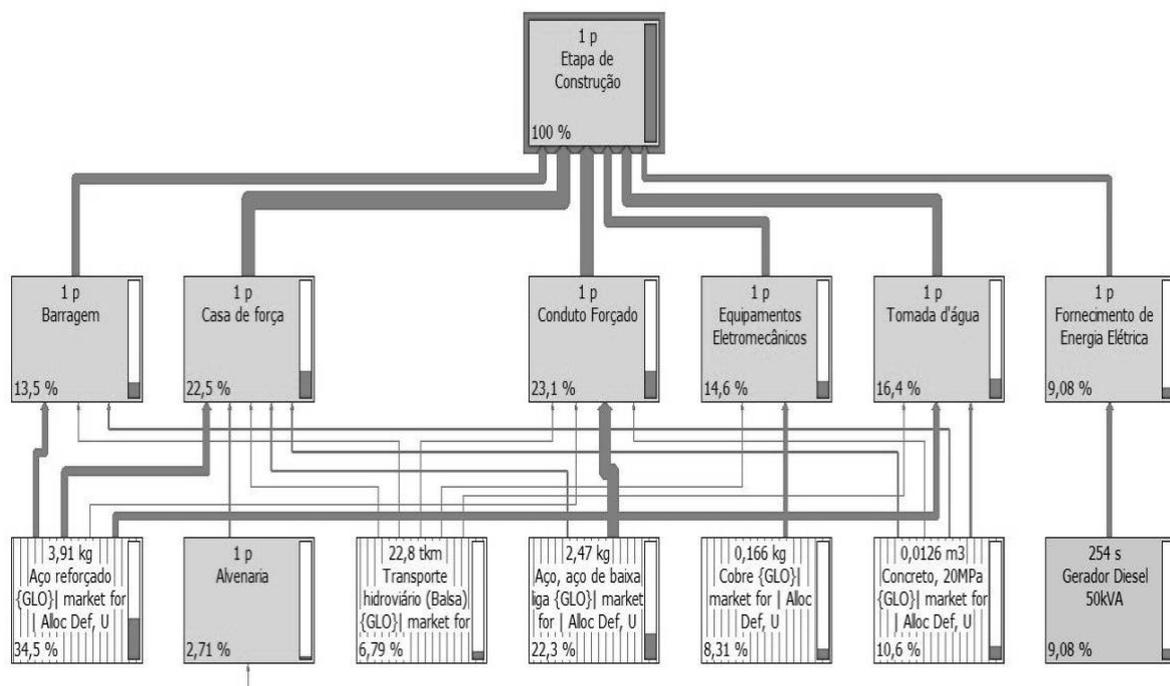
Dois métodos foram utilizados para a avaliação, o *Cumulative Energy Demand* (CED), que adota argumentos da primeira lei da Termodinâmica e o *Cumulative Exergy Demand* (CExD), que argumenta pela segunda da Termodinâmica. Ambos os métodos são recomendados para projetos energético-intensivos, tais como centrais geradoras de energia elétrica, projetos de cogeração, plantas de produção de produtos de consumo, dentre outros (ADEDEJI, 2006; FRANGOPOULOS, 1992; HAU, 2002; SPATH, 1999). Tendo em vista que uma central hidrelétrica não lida com formas de energia térmicas (somente energias mecânicas), os dois métodos podem ser adotados indistintamente neste caso. No presente estudo, foram utilizados ambos os métodos visando comparar os resultados e avaliar qual é o mais adequado para a aplicação de um ACV neste tipo de empreendimento. O método CED contempla categorias de impacto *non-renewable* que são *fossil, nuclear e biomass* e categorias de impacto *renewable* que são *biomass (wind, solar e geothermal)* e *water*. O CExD inclui categorias *non-*

renewable que são fossil, nuclear, primary, metals e minerals e renewable que são kinetic, solar, potential, biomass e water (PRÉ, 2015).

### 3. Resultados e Discussão

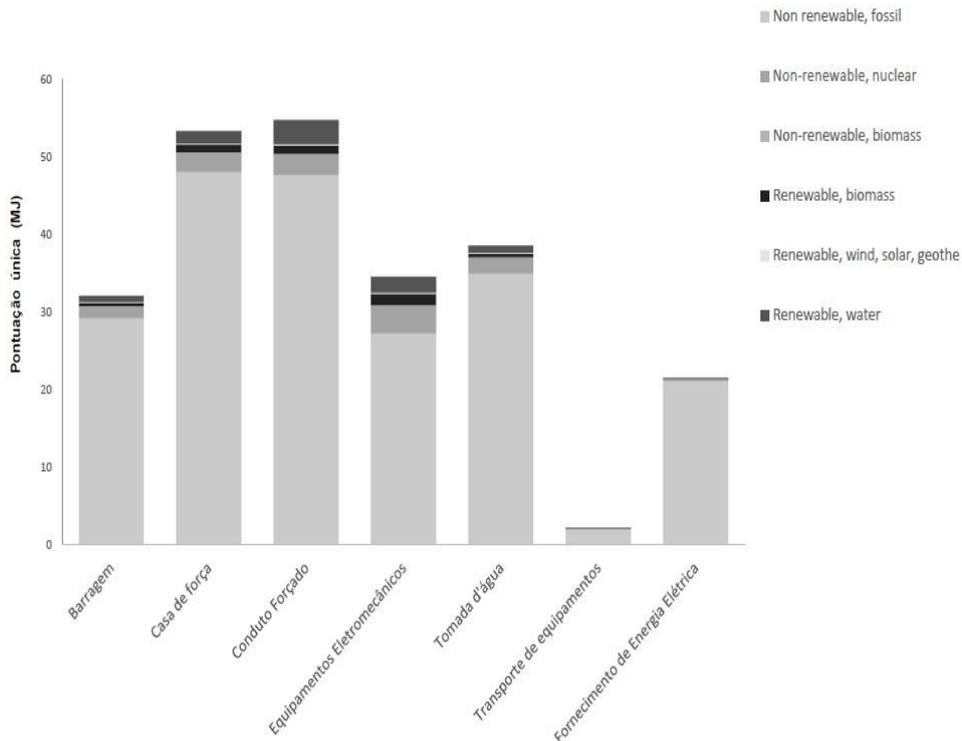
#### Avaliação de impactos pelo método CED

A etapa de construção da CGH Pari-Cachoeira apresentou impactos maiores para o conduto forçado (Figura 2), que é feito com grande quantidade de aço mecânico (27 t). Os impactos da casa de força, da tomada da água e da barragem foram provenientes do uso de aço estrutural e concreto. Adicionalmente, na casa de força, a alvenaria de vedação em tijolos cerâmicos correspondeu a 2,71% dos impactos desta etapa. O cobre, usado principalmente no gerador, é o maior responsável por impactos durante a montagem dos equipamentos eletromecânicos, seguido pelo aço dos componentes da turbina e, por fim, pelo fornecimento de energia elétrica durante a construção, que foi feito com grupo Diesel de 50 kVA.



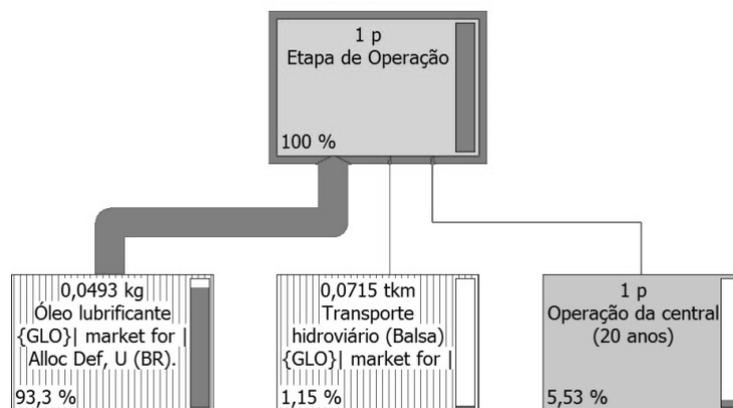
**Figura 2: Rede de impactos da etapa de construção da central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira, utilizando o método *Cumulative Energy Demand*, com pontuação única como indicador de impacto.**

A categoria *non-renewable/fossil* foi responsável pelo maior impacto em todos os componentes na etapa de construção (Figura 3). Isto evidencia a necessidade de melhoria dos processos em termos de eficiência energética e de diminuição da dependência de fontes energéticas fósseis. O consumo de água nas diversas etapas de produção dos componentes da CGH é o responsável pelos impactos associados à categoria *renewable/water* (Figura 3). Apesar da pouca contribuição da energia nuclear na matriz energética brasileira, os resultados foram influenciados pelo uso de processos *background* do *ecoinvent*, justificando a relevância da categoria *non-renewable/nuclear* (Figura 3).



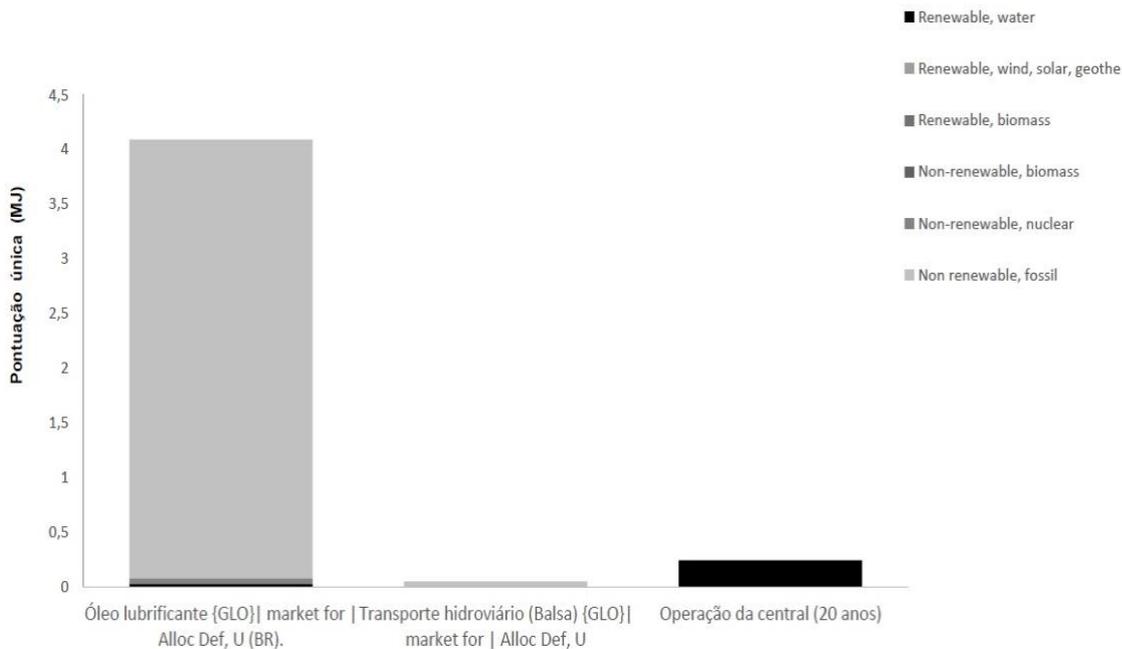
**Figura 3: Pontuação única (em MJ) dos impactos associados a cada componente da etapa de construção da central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira, utilizando o método *Cumulative Energy Demand*.**

Na etapa de operação da CGH, os subsistemas foram óleo, transporte e operação da central em uma escala de tempo de 20 anos (Figura 4). O uso de óleo lubrificante foi responsável por quase todo o impacto nesta etapa do empreendimento, seguido pela operação da central e pelo transporte (Figura 4).



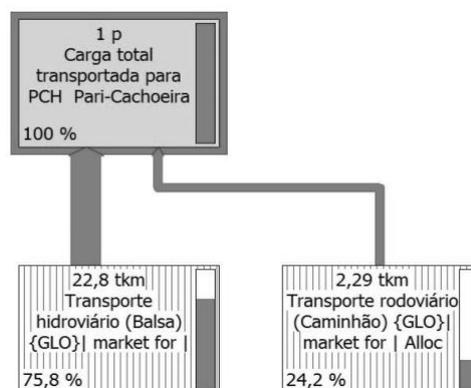
**Figura 4. Rede de impactos da etapa de operação da central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira, utilizando o método *Cumulative Energy Demand*, com pontuação única como indicador de impacto.**

Na pontuação única da etapa de operação da CGH, a categoria *non-renewable/fossil* apresentou o maior impacto devido ao uso de lubrificantes e o seu respectivo transportes. A categoria *renewable/water* apresentou impacto devido à sua representatividade na operação da central (Figura 5).

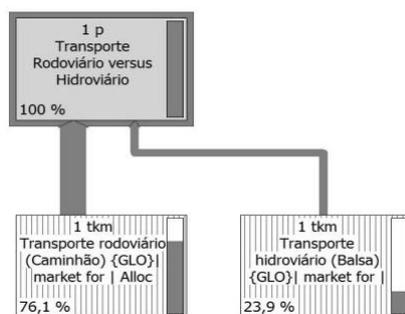


**Figura 5. Pontuação única (em MJ) dos impactos associados aos componente da etapa de operação da central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira, utilizando o método Cumulative Energy Demand.**

A maior parte do transporte durante as fases de construção e operação foi feito por meio hidroviário, dadas às características próprias da região amazônica (região com intensa malha hidroviária e poucas estradas e rodovias). O transporte rodoviário foi utilizado somente para o transporte das turbinas de Santa Catarina até Rondônia, a partir daí seguiram por balsa até o local da CGH Pari-Cachoeira. Portanto, o transporte rodoviário foi utilizado apenas para transportar em um trecho uma pequena carga do total de materiais necessário em Pari-Cachoeira. No entanto, mesmo com uma carga aproximadamente dez vezes menor, o transporte rodoviário foi responsável pela quarta parte do impacto total do transporte (Figura 6). Para possibilitar a avaliação dos impactos correspondentes a cada meio de transporte, avaliou-se o transporte de uma carga hipotética de 1 tonelada por vias terrestre e fluvial (Figura 7). Pode-se observar que o transporte da mesma carga teria um impacto muito maior pela via terrestre quando comparada à via fluvial. Portanto, uma característica regional da Amazônia, que é o deslocamento de bens e pessoas por meio fluvial, resultou em um impacto pequeno durante a construção e operação da CGH no item transporte.

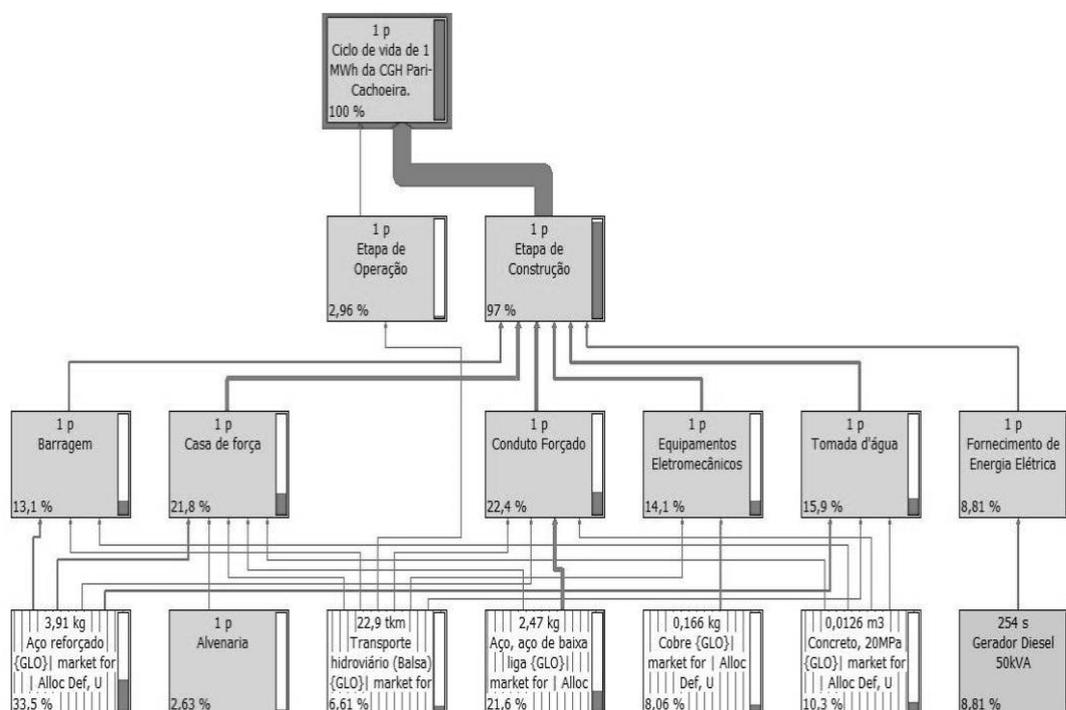


**Figura 6: Rede de impactos do material transportado para central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira por meio hidroviário e rodoviário, com pontuação única como indicador de impacto.**



**Figura 7: Rede de impactos da comparação hipotética do transporte de uma tonelada de material por quilômetro (tkm) por vias terrestre e fluvial, com pontuação única como indicador de impacto.**

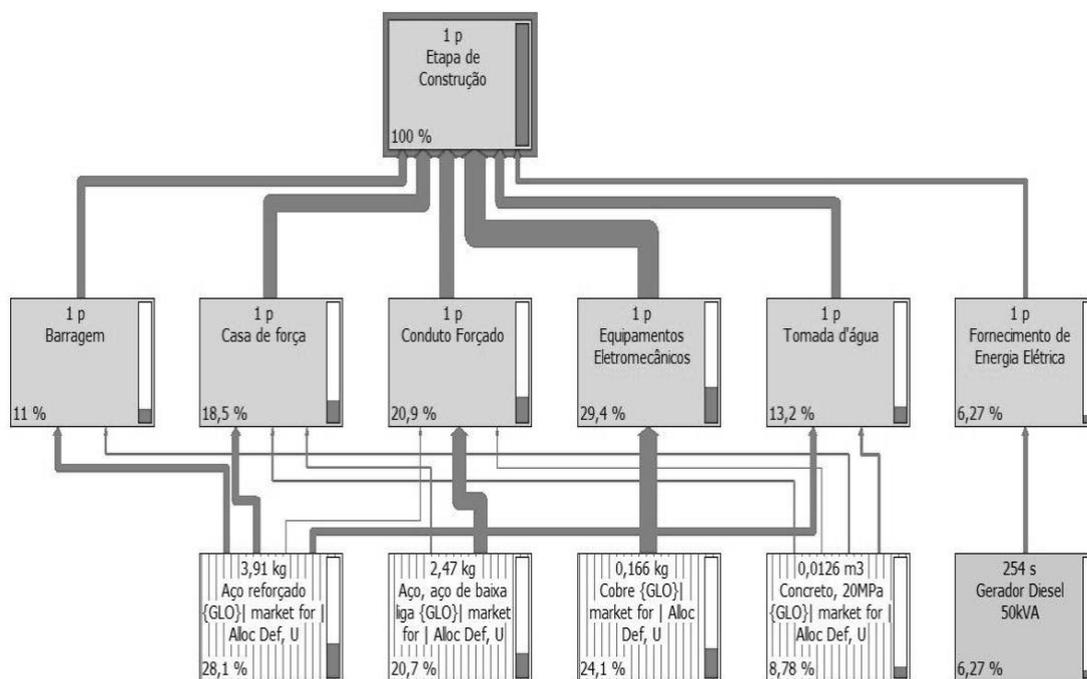
Avaliando-se os impactos das etapas de construção e operação em conjunto, observa-se que a primeira foi a maior responsável pelos impactos (Figura 8). A categoria de impacto dominante é *non-renewable/fossil* em ambas as etapas, o que evidencia a necessidade de diminuir o uso de fontes combustíveis fósseis. As hidrelétricas possuem como *input* da natureza o potencial de conversão de energia em reservatórios, *input* calculado e caracterizado pelo uso de água nos reservatórios (na etapa de operação). Deste modo, os impactos da operação deveriam ser maiores, assim como a relevância da categoria *renewable/water* dessa etapa. De fato, esta categoria foi importante na operação, contou com cerca de 5,5% dos impactos. No entanto, foi ainda bem menos impactante do que a categoria *non-renewable/fossil*, que contou com mais de 90% dos impactos observados (Figura 5). Como a central estudada é a fio d'água, o seu potencial hidráulico (predominantemente potencial e cinético) na conversão em energia elétrica é baixíssimo, justificando o menor impacto observado para *renewable/water*.



**Figura 8: Rede de impactos do ciclo de vida de 1 MWh de energia gerada pela central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira, utilizando o método *Cumulative Energy Demand*, com pontuação única como indicador de impacto.**

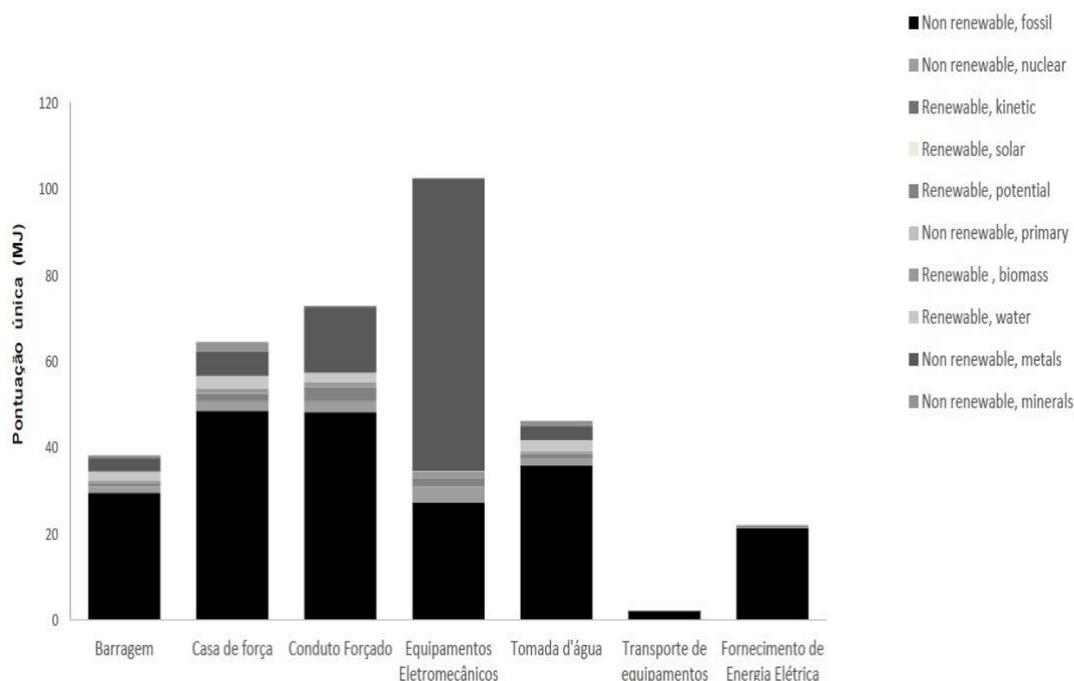
## Avaliação de impactos pelo método CExD

Na etapa de construção, os impactos quantificados pelo método CExD (Figura 9) foram bem similares aos apresentados pelo CED.



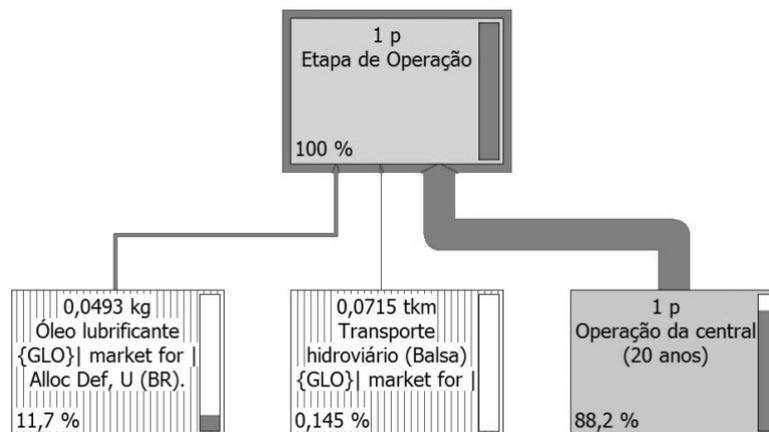
**Figura 9: Rede de impactos da etapa de construção da central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira, utilizando o método *Cumulative Exergy Demand*, com pontuação única como indicador de impacto.**

O maior impacto na pontuação única da etapa de construção foi na categoria *non-renewable/fossil* devido ao intenso uso dessa fonte energética (Figura 10). A grande quantidade de aço, mecânico e estrutural, e cobre utilizados na construção foi refletida na importância da categoria *non-renewable/metals* para os impactos (Figura 10).



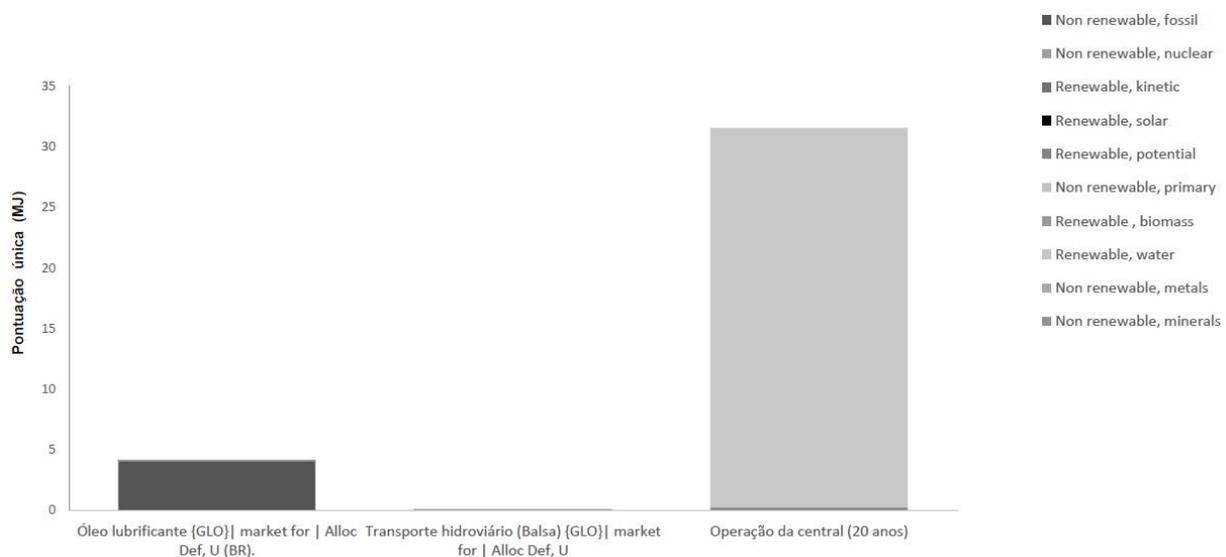
**Figura 10: Pontuação única (em MJ) dos impactos associados a cada componente da etapa de construção da central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira, utilizando o método *Cumulative Exergy Demand*.**

Na fase de operação da CGH, o processo operação da central foi responsável por quase todos os impactos (Figura 11). Neste processo, o método CExD contabiliza as diferentes fontes de energia (renováveis e não renováveis), assim como de recursos não energéticos (metais, minerais e água). Portanto, na operação da central essas contabilizações adicionais fizeram com que este processo respondesse por 88% dos impactos. O transporte e o uso de lubrificante representaram cerca de 12% dos impactos na etapa de operação quando avaliados pelo CExD (Figura 11).



**Figura 11. Rede de impactos da etapa de operação da central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira, utilizando o método *Cumulative Exergy Demand*, com pontuação única como indicador de impacto.**

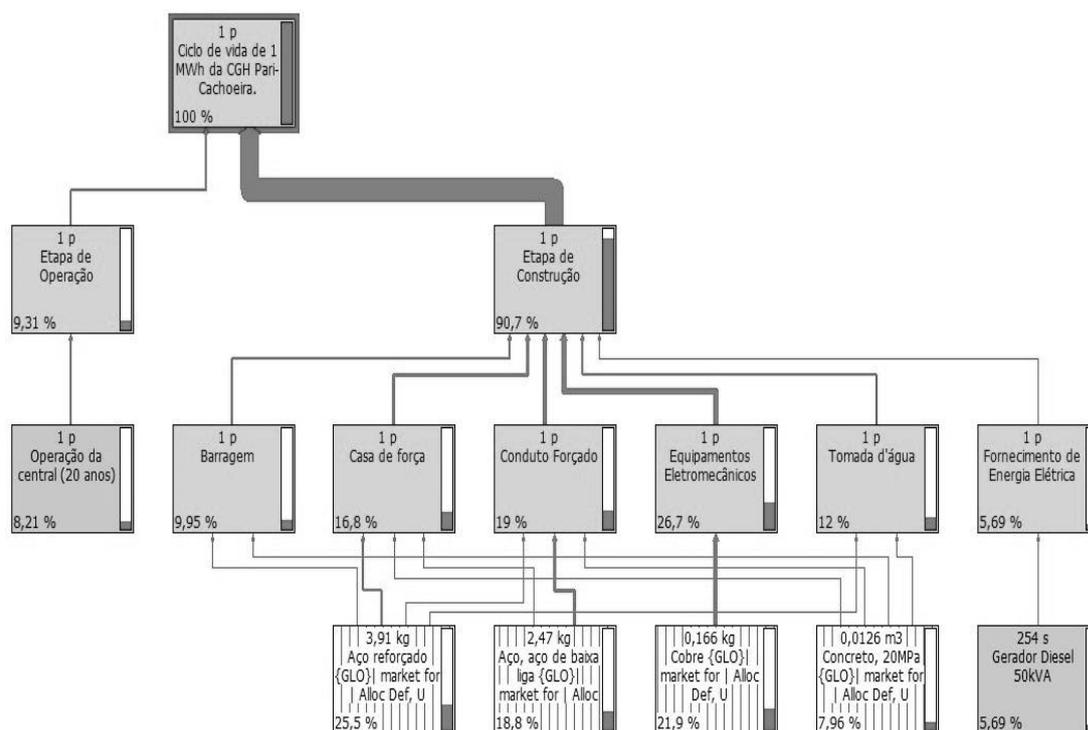
A categoria *renewable/water* foi a responsável pelo maior impacto da operação da central e a *non renewable/fossil* pelo uso de óleo lubrificante (Figura 12).



**Figura 12: Pontuação única (em MJ) dos impactos associados a cada componente da etapa de operação da central geradora hidrelétrica Pari-Cachoeira, utilizando o método *Cumulative Exergy Demand*.**

Na avaliação de Pari-Cachoeira pelo método CExD, a etapa de operação apresentou um impacto muito inferior à etapa de construção, aproximadamente um décimo do total (Figura 13). A operação da central foi a principal fonte de impacto observada na

etapa de operação graças às contabilizações dos recursos não energéticos. Na etapa de construção, o uso de aços, cobre e concreto foram as maiores fontes de impacto.



**Figura 13: Rede de impacto do ciclo de vida de 1 MWh de energia gerada pela central geradora hidrelétrica CGH Pari-Cachoeira, com método *Cumulative Exergy Demand*, pontuação única.**

### **Comparação entre os métodos CED e CExD na avaliação de impactos de Pari-Cachoeira**

Os dois métodos avaliam a demanda energética do ciclo de vida do produto ou serviço, porém, o CED é usado para avaliar o consumo de energia de fontes primárias e não leva em conta a qualidade da energia, já o CExD avalia a qualidade dos recursos energéticos, o que pode representar uma vantagem deste método. Além disso, no ecoinvent v3 o método CExD possui mais categorias de impactos que o CED (*primary, metal, minerals, potential e kinetic*) que avaliam a exergia das diferentes fontes de energia renováveis ou não renováveis e recursos não energéticos como a água, minerais e metais (MENOUI, 2011; BÖSH et al., 2007).

A avaliação de Pari-Cachoeira pelo método CExD, portanto, foi mais interessante devido às suas categorias de impacto adicionais e por ser a exergia uma medida de energia útil. Como resultado dessas diferenças entre os métodos, observou-se que, durante a fase de operação, os impactos gerados pela operação da central foram proporcionalmente mais importantes quando avaliados pelo método CExD do que pelo CED.

Processos relacionados aos elementos da natureza, como, por exemplo, emissões de gases de efeito estufa na área inundada pelo reservatório, a transformação da floresta em área de floresta morta inundada e o uso do solo não são vistos por ambos métodos (ALTHAUS et al., 2010). Os métodos somente contabilizam as entradas/insumos e não as saídas/emissões. Portanto, tais processos que sabidamente ocorrem em hidrelétricas não foram considerados neste estudo. Assim sendo, os impactos gerados por estas saídas não contabilizadas aqui também iriam contribuir com os impactos associados ao empreendimento. O método *Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment* avalia do ponto de vista exergético e o uso do solo (MENOUI, 2011) e o método *ReCiPe* também considera o uso do solo, além de outras categorias de impactos como depleção de combustíveis fósseis e

minerais e depleção de água doce (PRÉ, 2015). Portanto, estes dois métodos poderiam ser utilizados para avaliar as saídas/emissões de um empreendimento hidrelétrico.

Estudos de ACV em hidrelétricas do porte do presente estudo (CGH) nunca foram realizados no Brasil. Portanto, este é o primeiro trabalho que busca descrever os impactos associados com este tipo de empreendimento. Em UHEs, que são empreendimentos muito maiores do que o avaliado aqui, tal tipo avaliação de impacto já foi realizada. Na UHE Itaipu, foram destacados como os principais componentes de impacto na construção o aço e o cimento (RIBEIRO, 2003) como avaliado aqui na CGH Pari-Cachoeira. Os componentes dos equipamentos eletromecânicos tiveram uma grande representatividade, com destaque para o aço mecânico e cobre. A etapa de transporte não representou impactos expressivos na UHE Itaipu, tal como nesse estudo (RIBEIRO, 2003). Assim como no presente estudo, em Itaipu não foi avaliadas as saídas/emissões (RIBEIRO, 2003), portanto, os impactos associados também não foram contabilizados. Na UHE Frades (Portugal), os impactos na etapa de construção também foram predominantemente associados ao uso de aços de construção, cimento, aço mecânico e cobre dos equipamentos eletromecânicos (FERREIRA, 2007). Ao contrário do nosso estudo em Pari-Cachoeira, na operação da UHE Frades o consumo de energia elétrica foi importante geradora de impacto, tendo em vista que esta é de bombeamento e o seu consumo de energia é altíssimo (FERREIRA, 2007).

#### **4. Conclusões**

Na etapa de construção, o uso de aço e concreto são as principais fontes de impactos avaliados pelos métodos CED e CExD. Na operação, os resultados diferiram bastante, o método CED identificou o uso de lubrificante como item de maior impacto, já no CExD foi a operação da central. Como o CExD possui mais categorias de impacto do que o CED e avalia a qualidade dos recursos, os resultados apresentados pelo CExD são mais coerentes e confiáveis. Portanto, para estudos de ACV de hidrelétricas, recomendamos o uso do método CExD por oferecer resultados mais precisos, tanto na etapa de construção quanto na etapa de operação da central.

Este trabalho é um dos pioneiros na aplicação da ACV em hidrelétricas no âmbito nacional e em pequenos empreendimentos com as CGHs, contribuindo, desta forma, como uma referência dessa aplicação. Espera-se abrir portas para novos estudos e possibilitar a comparação entre empreendimentos e a consolidação da ferramenta ACV para estudos de impactos ambientais de hidrelétricas. Ressaltamos que no presente estudo não foram avaliados impactos sociais, ou ambientais como a perda de biodiversidade, de patrimônio histórico-cultural, ou as emissões/saídas de tal tipo de empreendimento (como a emissão de gases de efeito estufa). O presente trabalho mostra os impactos associados ao uso de materiais e energia na construção e operação de uma CGH e pretende servir como um complemento na avaliação dos impactos já extensivamente documentados para hidrelétricas.

#### **Referências**

- ACV BRASIL. Soluções computacionais: Simapro®; ecoinvent v3, 2016. Disponível em: <<http://www.acvbrasil.com.br/solucoes-computacionais/>>. Acesso em: 23 mar. 2016.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- ANEEL. BIG – Banco de Informações de Geração, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 22 jan. 2016.

ALTHAUS, H.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; FRISCHKNECHT, R.; HELLWEG, S.; HUMBERT, S.; JUNGBLUTH, N.; KÖLLNER, T.; LOERINCIK, Y.; MARGNI, M.; NEMECEK, T. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods,ecoinvent report No. 3. 2010. Swiss center for life cycle inventories, Switzerland.

ADEDEJI, A.A. Optimum Design of an Expanded Cumulative Exergy Consumption in a Strawbale-walled Building. *Nigerian Journal of Construction Technology and Management*, v. 7, n. 1, 2006, p. 146-156.

BOSCH, M.E.; HELLWEG, S.; HUIJBREGTS, M.A.J.; FRISCHKNECHT, R. Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the Ecoinvent Database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 12, n. 3, 2007, p. 181-190.

BERMANN, C. *Energia no Brasil: para quê? Para quem? Crise e alternativas para um país sustentável*. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2002, 139 p.

CAMPOS, M.G. Abordagem de ciclo de vida na avaliação de Impactos ambientais no processamento primário offshore. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 121 p.

CONDEIXA, K.M.S. Comparação entre materiais da construção civil através da avaliação do ciclo de vida: sistema drywall e alvenaria de vedação. 2013. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense. Niterói, 193 p.

CARVALHO, P.G.C. Aplicação do programa SimaPro na avaliação do impacto ambiental causado na produção e exploração offshore de petróleo. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 60 p.

CASTELLO, C.; MACEDO, M.N. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Global Change Biology*, v.22, 2016, p. 990–1007

FERREIRA, J.V. *Gestão Ambiental: Análise de Ciclo de Vida dos Produtos*. 2004, Instituto Politécnico de Viseu. Portugal, 78 p.

FERREIRA, M.M. Avaliação de Ciclo de Vida de uma Central Hidroelétrica: Central de Frades, caso de estudo na EDP – Energias de Portugal, S.A. 2007, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico/ Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 81 p.

FEARNSIDE, P.M. Gases de efeito estufa em hidrelétricas da Amazônia. *Ciência Hoje*, v. 36, n. 211, 2004, p. 41-44.

FRANGOPOULOS, C.A. An Introduction to Environomic Analysis and Optimization of Energy Systems. International Symposium on Efficiency, Costs, Optimization and Simulation of energy Systems. Spain, ECOS'92, 1992, p. 230-239.

GOEDKOOOP, M.; OELE, M.; LEIJTING, J.; PONSIOE, T.; MEIJER, E. Introduction to LCA with SimaPro. 2013, PRé Sustainability, 77 p.

HAU, J.L. Integrating Life Cycle Assessment, Exergy, and Energy Analysis. 2002. Thesis (Mestrado). Graduate School of the Ohio State University. E.U.A., 159 p.

KASPER, D.; FORSBERG, B.R.; AMARAL, J.H.F.; LEITÃO, R.P.; PY-DANIEL, S.; BASTOS, W.R.; MALM, O. Reservoir Stratification Affects Methylmercury Levels in River Water, Plankton, and Fish Downstream from Balbina Hydroelectric Dam. *Environmental Science and Technology*, v. 48, 2014, p. 1032-1040.

InterfacEHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade - Vol. 12 no 2 – Dezembro de 2017

- KEMENES, A.; FORSBERG, B.R.; MELACK, J. As hidrelétricas e o aquecimento global. *Ciência Hoje*, v. 36, n. 211, 2008, p. 20-25.
- LOPES, R. Avaliação do ciclo de vida simplificada do cimento Portland. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 48 p.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 5th Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA, 2006.
- MENOUFI, K.A.I. Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art. University of Lleida Polytechnic School Master of Applied Sciences in Engineering. Spain, 2011, 60 p.
- PRÉ. PRÉ Sustainability: SimaPro Database Manual - Methods library. 2015, 77 p.
- PAIVA, M.P. Impacto das grandes represas sobre o meio ambiente. *Ciência e Cultura*, v. 35, n. 9, 1983, p. 1274-1282.
- REN21. 2009. *Renewables Global Status Report*. Update. GTZ, Paris.
- RIBEIRO, F.M. Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil - Usina de Itaipu: primeira aproximação. 2003, Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (PIPGE/ USP). São Paulo, 165 p.
- SPATH, P.L.; MANN, M.K.; KERR, D.R. Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production. National Renewable Energy Laboratory (NREL) of the US Dept. of energy. U.E.A., 1999, 92 p.
- SANTOS, G.M. Impactos da hidrelétrica Samuel sobre as comunidades de peixes do rio Jamari (Rondônia, Brasil). *Acta Amazônica*, v. 25, n. 3/4, 1995, p. 247-280.
- SOUZA, D. M; SOARES, S. R; SOUZA, S. R. A Life Cycle Impact Assessment Method for the Brazilian Context. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL CICLO DE VIDA, 2., 2007, São Paulo.
- SOUZA, M.G.R. Avaliação de Ciclo de Vida do Carvão Energético. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 89 p.