



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DOUTORADO SOCIEDADE, NATUREZA E  
DESENVOLVIMENTO**

**MARLA TERESINHA BARBOSA GELLER**

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA USINA HIDRELÉTRICA DE CURUÁ-UNA  
(Baixo Amazonas, Brasil)**

**Santarém, PA  
Outubro de 2016**

**MARLA TERESINHA BARBOSA GELLER**

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA USINA HIDRELÉTRICA DE CURUÁ-UNA  
(Baixo Amazonas, Brasil)**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sociedade Natureza e Desenvolvimento – PPGSND, da Universidade Federal do Oeste do Para – UFOPA, como parte dos requisitos à obtenção do título de Doutora em Sociedade Natureza e Desenvolvimento.

**ORIENTADOR: PROF. DR. ANDERSON ALVARENGA DE MOURA MENESES**

**Santarém, PA  
Outubro de 2016**

**MARLA TERESINHA BARBOSA GELLER**

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA USINA HIDRELÉTRICA DE CURUÁ-UNA  
(Baixo Amazonas, Brasil)**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sociedade Natureza e Desenvolvimento – PPGSND, da Universidade Federal do Oeste do Para – UFOPA, como parte dos requisitos à obtenção do título de Doutora em Sociedade Natureza e Desenvolvimento.

**AVALIADORES:**

---

Prof. Dr. ANDERSON ALVARENGA DE M. MENESES  
(Presidente da Banca)

---

Profa. Dra. MARIA EMÍLIA LIMA TOSTES

---

Prof. Dr. MANOEL ROBERVAL PIMENTEL SANTOS

---

Prof. Dr. JULIO TÓTA DA SILVA

---

Prof. Dr. RODRIGO DA SILVA

---

Prof. Dr. RODOLFO MADURO ALMEIDA

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, à Deus por ter-me permitido a VIDA e aos meus pais por torná-la possível e me presentarem com uma digna herança de alma.

Ao meu esposo Rodolfo Hans Geller e aos meus filhos Gustavo, Gabriel e Juliana, que além das muitas manifestações de incentivo, compreenderam a importância de cada momento vivido nestes quatro anos, e souberam, principalmente, respeitar o meu tempo. Obrigada por acreditarem que eu seria capaz.

À senhora dona de grandes inspirações, Neide Silva Boabaid, que acompanhou com muito orgulho e emoção minhas conquistas. Escutarei sempre teus elogios em voz vibrante.

Ao Prof. Anderson Alvarenga de Moura Meneses, meu orientador, que mostrou o caminho e com sua sabedoria me fez caminhar segura, mesmo quando tudo parecia muito difícil. Os desafios propostos e vencidos valorizaram nosso trabalho.

Aos meus colegas professores do Curso de Sistemas de Informação do CEULS/ULBRA, que dividiram as responsabilidades para que todos pudéssemos alcançar nossos objetivos. Ao reitor da instituição, Prof. Ildo Schlender obrigada pela confiança em meu trabalho.

Meu agradecimento ao Programa PPGSND e a UFOPA, pela oportunidade. Em especial a profa. Tereza Ximenez que dirigiu o programa, recebeu e conduziu esta primeira turma.

À empresa Eletrobrás/Eletronorte agradeço através dos seus representantes Eng.º Sr. Antônio Ramalheiro e Sr. José de Arimatéia, que facilitaram o acesso as informações. E em especial ao Sr. Mário Pedreiro - Coordenador de manutenção e meio ambiente da divisão de geração hidráulica da UHE de Curuá-Una, que se mostrou incansável disponibilizando os dados necessários para o trabalho.

Aos professores do PPGSND que conduziram este caminho na busca pelo conhecimento e aos professores, Roberval Santos, Roseilson Sousa do Vale e Manoel Cruz, agradeço a contribuição, quando esclarecimentos específicos de suas áreas foram necessários. Ao secretário do programa, Euclides Ribeiro, meu agradecimento pela disponibilidade em atender com presteza, nossas demandas.

Aos muitos que torceram: familiares, amigos, colaboradores, minha sincera gratidão.

Considero uma conquista de todos.

## RESUMO

Um dos grandes desafios em relação ao setor energético nos próximos anos, tanto para o Brasil como para todas as nações é produzir energia limpa, com baixo custo e mínimo impacto ambiental, com capacidade suficiente para atender a crescente demanda. Em vista disto, muitas hidrelétricas estão sendo implantadas na região norte do Brasil, onde as bacias hidrográficas possuem grande potencial a ser explorado. Porém, a questão sobre os impactos ambientais de hidrelétricas ainda não é totalmente conhecida, sendo necessário estudos mais detalhados e específicos desta tecnologia. O objetivo deste trabalho foi a investigação dos impactos ambientais das fases de construção, operação, manutenção e desativação de uma hidrelétrica baseada na Análise do Ciclo de Vida. O foco da pesquisa foi a hidrelétrica de Curuá-Una, localizada na região amazônica, na cidade de Santarém – PA. Os resultados são apresentados em relação a produção tendo como unidade funcional 1 MWh, para que possíveis comparações possam ser realizadas. As categorias analisadas foram: Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Acidificação, Toxicidade Humana, Depleção de Recursos Abióticos e Potencial de Ecotoxicidade da Água. Os resultados obtidos pela Análise do Ciclo de Vida apontam a fase de construção como a mais influente para as emissões e os insumos que mais contribuem para tais emissões são o aço e o concreto. Considerando o fator produtividade, os índices encontrados no cenário de maior produtividade foram menores do que no cenário de menor produtividade. A comparação dos resultados da ACV da UHE Curuá-Una com ACVs de trabalhos que analisaram outras tecnologias de produção de energia, indica que para as categorias analisadas a hidrelétrica tem boa performance ambiental, considerando as emissões quantificadas por esta metodologia.

## ABSTRACT

Brazil as well as the rest of the world, faces a major challenge related to the electricity sector, to meet the growing demand with energy production from renewable sources. Many hydroelectric plants are being implemented, especially in the northern region of Brazil, where river basins have still great potential to be explored. However, the question about the environmental impacts of hydroelectric dams is still not fully known, and more detailed and specific studies of this technology are needed. Thus, the objective of the present study is the investigation of environmental impacts of the construction, operation and decommissioning of a hydroelectric power station based on Life-Cycle Assessment. The main focus is the Curuá-Una hydropower plant which is located in the Amazon forest in northern Brazil, in Santarém municipality (Pará state). The results are presented in relation to production having as functional unit 1 MWh, so that comparisons can be made. The categories analyzed were: Acidification Potential, Global Warming Potential, Abiotic Depletion Resources, Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential and Human Toxicity Potential. Results for Life Cycle Analysis show the construction phase as most influential to emissions and the inputs that contribute most to these emissions are steel and concrete. Considering the productivity factor, the indices found in the scenario of higher productivity were lower than in the scenario of lower productivity. The comparison of the ACV results of the Curuá-Una HPP with ACVs of studies that analyzed other energy production technologies indicates that for the analyzed categories the hydroelectric plant has a good environmental performance, considering the emissions quantified by this methodology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Aumento na capacidade (%) das energias renováveis - comparação entre o período de 2010 a 2015 e o ano de 2015. ....	22
Figura 2.2 - Mapa da interligação da rede de energia pelo SIN. ....	27
Figura.2.3-Framework EASETECH Energy .....	40
Figura 3.1-Ciclo de vida de um produto.....	43
Figura 3.2 - Abordagem do berço ao túmulo. ....	44
Figura 3.3 - Abordagem do berço ao berço. ....	44
Figura 3.4 - Etapas da ACV. ....	49
Figura 3.5 - Mecanismo Ambiental.....	51
Figura 3.6 - Relação entre "midpoint" e "endpoint".....	52
Figura 4.1 Modelo de processo da ACV da UHE de Curuá-Una e as atividades de cada etapa. ....	61
Figura 5.1 - Mapa de localização da UHE de Curuá-Una. ....	71
Figura 5.2 - Vista aérea da UHE de Curuá-Una. ....	72
Figura 5.3 - Planta da UHE de Curuá-Una. ....	73
Figura 5.4 - Visão conceitual da fronteira do sistema para ACV da UHE de Curuá-Una. ....	78
Figura 5.5 - Fronteira do sistema especificando os processos incluídos no ICV da UHE de Curuá-Una. ....	80
Figura 5.6 – Implementação dos fluxos presentes no Ciclo de Vida da UHE de Curuá-Una, no software openLCA 1.4.2.....	90
Figura 5.7 - Gráfico comparativo entre as 4 fases da ACV da UHE de Curuá-Una, para cada categoria de impacto. ....	93
Figura 5.8 - Percentual de contribuição dos insumos para cada categoria de impacto analisada. ....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Países líderes na capacidade de produção através de hidrelétricas no final de 2015. .....	23
Tabela 2.2- Matriz da capacidade instalada da geração elétrica no Brasil. ....	25
Tabela 2.3 - Matriz de produção de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN)..	26
Tabela 2.4 – Evolução da matriz de produção de energia elétrica de sistemas isolados. ....	26
Tabela 2.5 – Aumento projetado de capacidade instalada (MW). ....	28
Tabela 2.6 – Projeção da produção e consumo de eletricidade para 2030. ....	29
Tabela 2.7– Cinco estados com maior potencial hidrelétrico brasileiro.....	31
Tabela 2.8 – Parque gerador Eletrobrás Eletronorte.....	32
Tabela 2.9 – Parque gerador Eletrobrás Amazonas.....	33
Tabela 4.1- Cálculo para obter a produção em 100 anos em MWh com 92,89% de capacidade. .....	63
Tabela 4.2 - Exemplo de cálculo para insumos relativos a 1 MWh. ....	63
Tabela 4.3 - Cálculo para obter a produção em 100 anos (MWh), com aproximadamente 70% de capacidade de produção .....	64
Tabela 5.1. Relação área do reservatório pela capacidade de UHEs.....	75
Tabela 5.2- Características Gerais da UHE de Curuá-Una. ....	76
Tabela 5.3 - Área ocupada pela infraestrutura da UHE de Curuá-Una. ....	81
Tabela 5.4 - Quantidade de aço e cobre para os equipamentos da UHE de Curuá-Una. ....	85
Tabela 5.5 - Inventário dos insumos incluídos na ACV da UHE de Curuá-Una. Cenário A com produção de 92,89% e cenário B com produção de 70%. ....	89
Tabela 5.6 - Análise dos impactos por fases da ACV – Cenário A.....	91
Tabela 5.7 - Percentual de contribuição das categorias de impacto, em cada fase da ACV. ...	92
Tabela 5.8 - Percentual de contribuição dos principais insumos, por categoria de impacto. ...	93
Tabela 5.9 - Variação no nível do reservatório da UHE de Curuá-Una e influência na potência. .....	94
Tabela 5.10 - Análise de impacto por fases da ACV – Cenário B .....	95
Tabela 5.11 - Categorias de Impacto para o Cenário A e Cenário B. ....	95
Tabela 5.12 - Análise endpoint para o cenário A. ....	96
Tabela 5.13 - Análise endpoint para o cenário B. ....	96
Tabela 6.1– Simulação para uso de 5% a mais de aço e concreto na obra.....	98
Tabela 6.2 – Contribuição das emissões relativas a diferentes fontes de energia analisada pela Vattenfall, na categoria GWP.....	100
Tabela 6.3 – Faixa de valores para a categoria GWP das diferentes fontes de energia encontradas no estudo de Turconi. ....	101
Tabela 6.4 – Comparação das emissões pelas diversas fontes de produção de energia segundo o trabalho de Gagnon.....	101
Tabela 6.5 - Resultados obtidos na ACV de Guanyinyan para 1 MWh.....	106
Tabela 6.6 - - Resultados da ACV das hidrelétricas nas ilhas Maurício para 1 MWh, comparadas com as outras fontes de energia. ....	107
Tabela 6.7– Média dos resultados das ACVs de 5 minis hidrelétricas na Tailândia para 1 MWh. .....	108
Tabela 6.8 - Resultado da ACV para a hidrelétrica no Japão para 1 MWh.....	108
Tabela 6.9 - Resultados do estudo de Raadal et al (2011) sobre ACVs de hidrelétricas. ....	109
Tabela 6.10 – Resultados de diversos trabalhos da emissão de GEEs contabilizados por ACVs de hidrelétricas, comparados com a UHE de Curuá-Una. ....	110

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Países com maior capacidade de produção de energia renovável – final de 2015. .....	22
Quadro 3.1 - Categorias de impacto utilizadas para a etapa de Análise de Impacto em uma ACV. .....	52
Quadro 4.1 - Relação entre os indicadores midpoint e endpoint, que possuem ligação quantitativa no método ReCiPe 2008. ....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
ADP	<i>Depletion of Abiotic Resources</i> - Depleção dos Recursos Abióticos
AICV	Análise do Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AP	<i>Acidification Potential</i> - Potencial de Acidificação
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i> - Demanda de Energia Cumulativa
CHP	<i>Combined Heat and Power</i> – Usina para gerar eletricidade e calor simultaneamente.
COV	Compostos orgânicos voláteis
CSP	<i>Concentrating Solar Power</i> – Solar Térmica Concentrada
DALY	<i>Disability Adjusted Life Year</i> - Anos de vida ajustados por incapacidade
EIA	<i>Environmental Impact Assessment</i> -Análise de Impacto Ambiental
EOL	Usina Eólica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAETP	<i>Freshwater Aquatic Ecotoxicity</i> - Potencial de Ecotoxicidade da Água Doce
FV	Fotovoltaica
GEE	Gás de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	<i>Global Warm Potential</i> - Potencial de Aquecimento Global
HTP	Human Toxicity - Toxicidade Humana
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IES	<i>Institute for Environment and Sustainability</i> -Instituto para o Ambiente e Sustentabilidade
IGS	Inventário Geral Simplificado
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System</i> – Sistema Internacional de referência de dados do ciclo de vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> - Organização Internacional para Padronização
JRC	<i>Joint Research Centre</i> – Centro Integrado de Pesquisa
OGH	Sistema de Gestão da Geração Hidráulica Interligada
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
SETAC	<i>Society for Environmental Toxicology and Chemistry</i> - Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFV	Usina Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termoelétrica

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO.....	15
1.2 OBJETIVO GERAL.....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4 RELEVÂNCIA, INTERDISCIPLINARIDADE E ORIGINALIDADE DA TESE.....	16
1.5 VISÃO GERAL DOS CAPÍTULOS.....	18
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>20</b>
<b>CONTEXTUALIZAÇÃO.....</b>	<b>20</b>
2.1 CENÁRIOS DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR FONTES RENOVÁVEIS.....	20
2.1.1 Cenário no mundo.....	21
2.1.2 Cenário no Brasil.....	24
2.1.3 Cenário na Amazônia.....	31
2.2 USINAS HIDRELÉTRICAS: ASPECTOS AMBIENTAIS.....	34
2.3 TRABALHOS RELACIONADOS: ACV NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE.....	38
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>43</b>
<b>ANÁLISE DO CICLO DE VIDA - ABORDAGEM CONCEITUAL.....</b>	<b>43</b>
3.1 CONCEITO DE CICLO DE VIDA E DEFINIÇÃO DE ACV.....	43
3.2 BREVE HISTÓRICO DA ACV E SUA PADRONIZAÇÃO.....	46
3.3 METODOLOGIA PARA ACV.....	48
3.3.1 Definição do objetivo e escopo.....	49
3.3.2 Inventário do Ciclo de Vida - ICV.....	50
3.3.3 Análise de Impacto do Ciclo de Vida - AICV.....	50
3.3.4 Interpretação.....	54
3.4 MÉTODOS E FERRAMENTAS PARA AICV.....	55
3.4.1 Métodos para AICV.....	55
3.4.2 Bases de dados para AICV.....	57
3.4.3 Ferramentas para AICV.....	59
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>61</b>
<b>METODOLOGIA PARA ACV DA UHE DE CURUÁ-UNA.....</b>	<b>61</b>
4.1 PRIMEIRA ETAPA: DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO.....	62
4.2 SEGUNDA ETAPA: ANÁLISE DE INVENTÁRIO.....	62
4.2.1 Cenário A.....	64
4.2.2 Cenário B.....	64
4.3 TERCEIRA ETAPA: ANÁLISE DE IMPACTO.....	64
4.3.1 Análise midpoint – método CML 2001.....	65

<b>4.3.2 Análise endpoint – método ReCiPe</b> .....	<b>68</b>
<b>4.4 QUARTA ETAPA: DISCUSSÃO E CONCLUSÃO</b> .....	<b>70</b>
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>71</b>
<b>ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA HIDRELÉTRICA DE CURUÁ-UNA</b> .....	<b>71</b>
<b>5.1 OBJETIVO GERAL E ESCOPO</b> .....	<b>71</b>
<b>5.1.1 Caracterização da Hidrelétrica (UHE) de Curuá-Una</b> .....	<b>71</b>
<b>5.1.2 Objetivo da ACV da UHE de Curuá-Una</b> .....	<b>76</b>
<b>5.1.3 Fronteira do Sistema</b> .....	<b>77</b>
<b>5.1.4 Unidade Funcional</b> .....	<b>78</b>
<b>5.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV</b> .....	<b>78</b>
<b>5.2.1 Construção</b> .....	<b>80</b>
<b>5.2.2 Operação</b> .....	<b>85</b>
<b>5.2.3 Manutenção/Potencialização</b> .....	<b>86</b>
<b>5.2.4 Transporte</b> .....	<b>87</b>
<b>5.2.5 Desativação</b> .....	<b>87</b>
<b>5.3 ANÁLISE DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA – AICV</b> .....	<b>90</b>
<b>5.3.1 Análise midpoint – CML 2001</b> .....	<b>91</b>
<b>5.3.2 Análise endpoint - ReCiPe</b> .....	<b>95</b>
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>97</b>
<b>DISCUSSÕES</b> .....	<b>97</b>
<b>6.1 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>97</b>
<b>6.2 TRATAMENTO DE INCERTEZA</b> .....	<b>98</b>
<b>6.3 HIDRELÉTRICA E OUTRAS TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE SOB A ANÁLISE DE ACV</b> .....	<b>99</b>
<b>6.4 HIDRELÉTRICAS DE GRANDE PORTE E ACV DE CURUÁ-UNA</b> .....	<b>103</b>
<b>6.5 ALGUMAS VANTAGENS DE HIDRELÉTRICAS COM RESERVATÓRIO</b> .....	<b>104</b>
<b>6.6 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE OUTRAS ACVS DE UHES</b> .....	<b>105</b>
<b>6.7 AVALIANDO OS RESULTADOS DA ACV DA UHE DE CURUÁ-UNA EM RELAÇÃO A OUTROS TRABALHOS</b> .....	<b>109</b>
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>111</b>
<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>111</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>116</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>124</b>
<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>126</b>
<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>127</b>
<b>APÊNDICE D</b> .....	<b>128</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>130</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios em relação ao setor energético nos próximos anos é produzir energia limpa, com baixo custo e mínimo impacto ambiental, com capacidade suficiente para atender a crescente demanda. Embora os relatórios sobre o crescimento econômico e consumo de energia tenham registrado uma queda no ano de 2015, a previsão da média de consumo para os próximos 10 anos é o crescimento, ainda que menos aceleradamente. No relatório de 2015, ano base 2014, foi registrado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) a previsão de crescimento da economia mundial de 3,7% a.a.<sup>1</sup>, nos próximos dez anos, os quais consequentemente levariam ao aumento do consumo de eletricidade para atender os diferentes setores como indústrias, serviços, residências, etc. (EPE, 2015). Porém, registros recentes publicados no relatório de 31 de maio de 2016 da ENERDATA (2016), apontam que em 2015 houve um declínio no crescimento econômico mundial, tendo este alcançado apenas 2,8%. E ressaltam que os países membros do G20<sup>2</sup> tiveram um crescimento do consumo de energia de 0,5%, no mesmo ano, contrastando com a média dos últimos 10 anos de mais que 2% a.a.

Este panorama mundial tem reflexo também no Brasil. Em 2015, o consumo final de eletricidade no país registrou uma queda de 1,8% (EPE, 2016), consequência da retração econômica de 3,8% neste mesmo ano segundo informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (IBGE, 2015). Porém, o Plano Decenal de Expansão de Energia – 2024 (EPE, 2015b) prevê o crescimento da economia brasileira na faixa de 3,2 % a.a., gerando também o aumento no consumo final de eletricidade, que registra para o período de 2014-2019 um crescimento de 3,0% a.a e para 2019-2024 um crescimento de 5,1% a.a. (EPE, 2015b).

Soma-se a este cenário de crescimento da demanda, o fato de que o setor elétrico é responsável por 40% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) (OECD/IEA, 2013), sendo considerado um importante fator para os impactos ambientais e mudança do clima. Neste contexto, a busca de possibilidades de substituição de produtos e processos que têm quantidades significativas de emissões de GEE por aqueles mais sustentáveis tem aumentado, incluindo a produção de energia a partir de fontes renováveis.

---

<sup>1</sup> a.a – ao ano

<sup>2</sup> G20 – Grupo dos 20. É um fórum de cooperação internacional que reúne líderes, ministros das finanças e diretores dos bancos centrais de 20 economias: 19 países membros, incluindo o Brasil, mais a União Europeia. (OECD, 2016).

As discussões e iniciativas sobre o tema agregam esforços de todas as nações, a exemplo da Conferência Mundial do Clima já na década de 70, do protocolo de Kyoto em 1997 e mais recentemente a 21ª Conferência das Partes em Paris - COP21<sup>3</sup>. A necessidade de atender a crescente demanda de energia somada ao compromisso de produzir energia limpa e de fontes renováveis impulsiona o campo da pesquisa nesta área. A análise destes dois fatores (energia limpa e renovável) requer estudos críticos e detalhados das diferentes formas de produção de energia.

Conhecer os impactos ambientais dos diferentes sistemas de produção de eletricidade é um requisito essencial para as tomadas de decisão no campo energético. Uma das formas de obter este conhecimento é através da Análise do Ciclo de Vida (ACV) dos produtos. ACV é uma ferramenta de gestão ambiental para “avaliar os danos associados com produtos, processos ou atividades, através da quantificação e da identificação da quantidade de energia, material utilizado e resíduos gerados para o ambiente, e identificar oportunidades de melhorias” (FAVA *et al.*, 1991). A ACV permite a identificação dos impactos mais significativos e as etapas a serem observadas para a melhoria, evitando os danos a serem transmitidos de um estágio para outro, de um problema ambiental para outro ou de uma região para outra, dentro de uma abordagem holística e sistemática (AZAPAGIC, 1999). De acordo com a ISO 14040, ACV inclui quatro etapas: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, análise de impacto e interpretação dos resultados (ISO, 1997).

Atualmente a ACV está sendo utilizada para tomada de decisão na escolha da melhor opção entre produtos e processos em muitos contextos como na engenharia química (YUE, KIM e YOU, 2013), no uso de embalagens descartáveis (FOOLMAUN e RAMJEAWON, 2008), na agricultura (MEISTERLING, SAMARAS E SCHEIZER, 2009), no transporte de produtos (SPIELMAN *et al.*, 2005), e frequentemente na produção de energia. Por exemplo Yue, Kim e You (2013) usaram ACV para estudar o potencial sustentável da cadeia de biocombustível. Queiroz, França e Ponte (2012) usaram ACV para analisar o balanço da produção de biodiesel da palmeira do dendê. Dones *et al.* (2007) implementaram ACV para cobrir toda a rede de energia que produz eletricidade e calor, com foco na Suíça e Europa. Matuzewska (2011) usou ACV para identificar uma boa configuração para sistemas geotermiais. García-Valverde, Cherni e Urbina (2010); Desideri *et al.* (2012) e Laleman, Albrecht e Dewulf (2011) aplicaram ACV para estimar o impacto ambiental de sistemas fotovoltaicos.

---

<sup>3</sup> COP21 – detalhes no capítulo 2, subcapítulo 2.1.

Brizmohun, Ramjeawon e Azapagic (2015) implementaram ACV para analisar a geração de eletricidade nas ilhas Maurício, na costa da África. Algumas pesquisas (PANG *et al.*, 2015; RIBEIRO, F. DE M., 2004; SANTOYO-CASTELAZO, GUJBA e AZAPAGIC, 2011; FLURY e FRISCHKNECHT, 2012); SUWANIT e GHEEWALA, 2011; VATTENFALL, 2005) tem analisado o ciclo de vida de hidrelétricas utilizando ACV, devido a importância deste tipo da energia hidráulica no cenário mundial.

A ACV é usada neste trabalho para pesquisar os impactos ambientais na produção de energia de uma pequena hidrelétrica na região amazônica. A unidade analisada é a Usina Hidrelétrica (UHE) de Curuá-Una, localizada na cidade de Santarém/Pará, Brasil. Os dados encontrados na etapa do inventário são analisados através do software openLCA 1.4.2 com a base de dados do Ecoinvent, produzindo valores ligados a uma unidade funcional, permitindo realizar comparações de cenários. Os resultados obtidos neste trabalho apontam os principais contribuintes para os impactos ambientais da UHE de Curuá-Una e ressalta que a fase de construção é a principal responsável pelos danos.

As principais contribuições do presente trabalho são: (i) inventário da UHE de Curuá-Una incluindo equipamentos e material da infraestrutura, (ii) ACV da UHE de Curuá-Una cobrindo as fases de construção, operação e manutenção, transporte e desativação; (iii) avaliação das principais categorias de impacto para estas fases incluindo aquecimento global, depleção dos recursos abióticos, acidificação, ecotoxicidade da água doce e toxicidade humana; (iv) análise de sensibilidade para diferentes cenários (nível normal e baixo) do reservatório; (v) discussões acerca dos resultados obtidos e o que apresenta a literatura.

## 1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

A energia hidráulica é considerada no Brasil uma das principais fontes de energia, tendo 71,1% de sua matriz energética constituída por hidrelétricas, o que não é realidade em muitos outros países devido as suas características e ao baixo potencial hidrelétrico destes. O relatório do Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT, registrou para o ano de 2015, o potencial total hidrelétrico brasileiro como 247.465,01 MW, dos quais 94.125 MW estão em operação, e 13.949,32 MW em construção. Segundo o mesmo relatório o potencial hidrelétrico brasileiro a ser explorado é de 139.390,3 MW dos quais aproximadamente 35% (49.819,85 MW) estão nos estados do Pará e Amazonas. (ELETROBRAS, 2015).

Entretanto, os estudos sobre os impactos das hidrelétricas têm causado discussões a respeito das consequências ambientais desta tecnologia. Segundo Fearnside (2005), Fearnside

(2015) e Faria *et al.* (2015), hidrelétricas em regiões tropicais tem maior produção de GEEs do que as hidrelétricas em regiões boreais, colocando em dúvida se esta é realmente a melhor solução para atender o crescimento da demanda. Analisar todas as etapas do ciclo de vida de uma hidrelétrica, considerar a sua capacidade de produzir energia segura, estudar as possibilidades de melhoria na tecnologia de implantação, utilizar o potencial hidráulico de forma otimizada, são fatores que podem aumentar o conhecimento sobre os reais impactos e benefícios da implantação das hidrelétricas na Amazônia.

Desta forma, a investigação desta tese se concentra no seguinte problema: Quais os impactos ambientais de uma pequena hidrelétrica, localizada na região amazônica, considerando a metodologia de ACV?

## 1.2 OBJETIVO GERAL

A principal ideia do projeto é determinar os impactos ambientais de uma pequena hidrelétrica localizada na região amazônica (Hidrelétrica de Curuá-Una/Santarém/Pará/Brasil) com base na ACV, para futuras comparações com outras fontes de energia.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Criar um modelo de processo para ACV de Curuá-Una;
- b) Descrever aspectos da UHE de Curuá-Una, como estrutura física, localização, produtividade, etc.
- c) Produzir um inventário dos principais insumos utilizados em todo o ciclo de vida da UHE de Curuá-Una;
- d) Analisar as emissões geradas e categorizá-las em impactos ambientais;
- e) Analisar diferentes cenários considerando variabilidade na produção;
- f) Avaliar os resultados em relação a estudos semelhantes.

## 1.4 RELEVÂNCIA, INTERDISCIPLINARIDADE E ORIGINALIDADE DA TESE

Definir qual a melhor forma de oferecer energia confiável para atender o crescimento econômico com o menor impacto ambiental se constitui um estudo complexo, onde é necessário considerar todo o ciclo de vida de uma usina. A questão é complexa quando se tem vários fatores a serem considerados, como insumos utilizados na construção e operação, a fonte de energia utilizada, o tempo de vida da usina, a localização, a produtividade ao longo de sua vida

útil, a área afetada, o descarte de matéria prima quando da desativação, enfim, os fatores que podem influenciar os resultados são muitos.

A literatura mostra diferentes métodos utilizados para analisar quais as formas de energia mais produtivas e que causam menos impactos ambientais. Em se tratando de hidrelétricas de reservatório uma das principais controvérsias sobre os danos ambientais é a inexistência de um método consolidado para analisar as emissões futuras, por serem tecnologias com grande tempo de vida. Outro fator que pode trazer resultados apenas parciais, é a dificuldade de obter dados reais para o inventário da etapa de construção das usinas hidrelétricas, o que muitas vezes é negligenciado. Uma das conclusões que Faria *et al.* (2015) apresenta é que “é essencial usar a informação científica disponível e desenvolver métodos para avaliar o potencial de GEEs provenientes de projetos hidrelétricos.” E complementa dizendo que “como as incertezas de nossos modelos são grandes é necessário explorar diversos cenários para cada caso, e proporcionar informações relevantes que sejam úteis para tomada de decisão”.

No Brasil, uma das principais fontes de energia são as hidrelétricas, que estão classificadas como renováveis, mas consideradas por alguns autores como não totalmente limpas, como apontam os trabalhos de Galy-Lacaux *et al.*, 1999; Duchemin *et al.*, 2000; Fearnside, 2005; Abril *et al.*, 2005; Fearnside, 2014; Faria *et al.*, 2015; dentre outros. Outros consideram que pela produtividade disponibilizada durante todo seu ciclo de vida, e por ser uma das fontes renováveis mais seguras em relação à instabilidade dos fenômenos climáticos, a hidroeletricidade ainda é a forma de energia mais viável para atender o crescimento econômico (VATTENFALL, 2005; KUMAR *et al.*, 2011; BRIZMOHUN, RAMJEAWON e AZAPAGIC, 2015). De um lado a viabilidade oferecida pela própria natureza e as vantagens econômicas que justificam a opção por grandes empreendimentos como os que estão sendo implementados na Amazônia; de outro, os diversos tipos de impactos e os impedimentos legais com o objetivo de evitar a degradação do meio ambiente. O que há de evidente em todos os estudos é a necessidade de maior investigação no que diz respeito a impactos, produtividade e custos da implantação de hidrelétricas. Tendo todos estes fatores em vista, o trabalho descrito na presente tese é relevante pois contribui para a discussão a respeito da implantação de usinas hidrelétricas na Amazônia, considerando os impactos ambientais.

A ACV, metodologia escolhida para análise neste trabalho, é considerada por si só uma metodologia holística (AZAPAGIC, 1999), em que para aplicá-la há necessidade de conhecimento interdisciplinar. Uma das complexidades de realizar a ACV de uma hidrelétrica

vem da necessidade de obter um inventário dos insumos utilizados na fase de construção, principalmente pela falta de dados históricos. Mas além disto, a diversidade destes insumos exige um conhecimento nas diversas áreas, a exemplo da engenharia, para contabilizar material de construção utilizado; da biologia para compreender os mecanismos de degradação da biomassa nas áreas alagadas; da química para entender o processo de transformação do carbono em metano e dióxido de carbono (principais GEEs), da matemática para padronizar as medidas, da tecnologia da informação para compilar os dados, enfim um tema extremamente interdisciplinar. Em suma, a complexidade do problema abordado na presente tese exige que o mesmo seja investigado utilizando-se recursos metodológicos de diversas áreas científicas, e não de modo restrito a uma disciplina/ciência específica.

No que tange a originalidade deste trabalho, ressalta-se que até onde foi pesquisado, não há trabalhos que aplicaram a ACV para pequenas hidrelétricas na região norte do Brasil, o que pode se constituir em um estudo importante para avaliação das possibilidades e potencialidades da região, considerando principalmente os impactos ambientais.

## 1.5 VISÃO GERAL DOS CAPÍTULOS

O texto apresenta-se dividido em capítulos descritos como:

Capítulo 1 – Introdução, com uma abordagem geral do trabalho.

Capítulo 2 – Contextualização. Apresenta-se uma revisão da literatura onde estão incluídos os principais conceitos e descrições necessárias para o entendimento do trabalho, como: descrição de cenários da geração de energia elétrica por fontes renováveis, usinas hidrelétricas e seus aspectos ambientais e trabalhos relacionados com ACV na geração de eletricidade.

Capítulo 3 – Análise do Ciclo de Vida - abordagem conceitual. Neste capítulo encontram-se o conceito de ciclo de vida e a definição da metodologia da ACV, um breve histórico da ACV e sua padronização, a metodologia, os métodos e as ferramentas para ACV.

Capítulo 4 – A metodologia da ACV aplicada à UHE de Curua-Una é detalhada neste capítulo com a descrição das atividades a serem realizadas em cada etapa.

Capítulo 5 - ACV da Hidrelétrica de Curuá-Una. Inicia-se neste capítulo a ACV, obedecendo a sequência das fases: objetivo geral e escopo, inventário do ciclo de vida, análise de impacto do ciclo de vida.

Capítulo 6 – Neste capítulo são apresentadas as discussões relativas aos resultados obtidos.

Capítulo 7 – A conclusão e uma abordagem sobre trabalhos futuros são apresentadas.

Finaliza-se com as Referências Bibliográficas.

## CAPÍTULO 2

### CONTEXTUALIZAÇÃO

Neste capítulo, o objetivo é contextualizar sobre alguns aspectos importantes que são essenciais para o entendimento do trabalho, como: apresentação dos cenários mundial, do Brasil e da Amazônia referente a geração de energia elétrica por fontes renováveis; comentários sobre os aspectos ambientais da geração de energia e relatos de algumas pesquisas realizadas referente a ACV de hidrelétricas.

#### 2.1 CENÁRIOS DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR FONTES RENOVÁVEIS

Conforme definição do Manual de Estatísticas de Energia (Energy Statistics - Manual, 2005) energia primária pode ser dividida em energia derivada de combustíveis fósseis e de fontes renováveis. As primeiras são produzidas a partir de recursos naturais que foram formados de biomassa no passado geológico. Por extensão, o termo fóssil é também aplicado a qualquer combustível secundário fabricado a partir de um combustível fóssil, como os produtos derivados do petróleo. Segundo este manual a energia nuclear é classificada neste tipo. As renováveis têm origem em fluxos recentes e constantes de energia como a força do vento, a luz solar, a força mecânica das águas. Inclui-se neste tipo a energia geotérmica.

As diferentes formas de geração de energia elétrica trazem consigo especificidades que implicam a necessidade de estudos diferenciados, como: a matéria prima utilizada, a tecnologia empregada, a localização geográfica, o clima, os impactos ambientais causados, os custos para implantação e de operação, etc. Além disso, a preocupação com a crescente demanda do consumo de energia, devido ao desenvolvimento econômico em todas as esferas (mundial, nacional e regional), leva ao aumento das pesquisas em relação aos problemas que advêm deste crescimento. Neste contexto, a produção de energia através do uso de fontes renováveis em substituição à produção por combustíveis fósseis faz parte da lista de prioridades de muitos países.

As políticas governamentais têm um papel importante na promoção do crescimento das energias renováveis fazendo com que em dezembro de 2015, em Paris na *United Nations Framework Convention on Climate Change's* (UNFCCC) ou 21ª Conferência das Partes (COP21), 195 países aprovassem um novo acordo, 173 países estabelecessem metas e 146 países elaborassem políticas de apoio para diminuição da temperatura global em 2 graus Celsius ([www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris](http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris)). Desta forma,

fortaleceram a resposta global à ameaça da mudança do clima e a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças, consolidando a importância da substituição dos combustíveis fósseis por fontes alternativas.

Cenários da Geração de Energia Elétrica são descritos por diversos estudos, abrangendo regiões, países e também o mundo. Saber como reduzir o impacto ambiental e, ao mesmo tempo, produzir o suficiente para suportar o crescimento econômico é preocupação presente e crescente no que se refere ao cenário atual.

### 2.1.1 Cenário no mundo

Segundo o relatório *Renewables 2016 – Global Status Report*, produzido pelo REN21 (*Renewable Energy Policy Network for 21st Century*) (REN21, 2016), “o ano de 2015 foi um ano excelente para as energias renováveis”, com aumento significativo na capacidade de geração, com uma estimativa de 147 GW de capacidade de energia renovável adicionada, sendo já as principais fontes de energia em muitos países. Embora os desafios permaneçam, dentre eles a baixa nos preços de derivados do petróleo e problemas com tecnologias de armazenamento, este crescimento é resultado de vários fatores como: melhoria na relação custo-competitividade de tecnologias renováveis, crescimento de políticas dedicadas ao setor, maior viabilidade de financiamento, necessidade de segurança energética, aumento da consciência ambiental, crescimento da demanda de energia no desenvolvimento e economias emergentes (REN21, 2016).

Ainda assim, este mesmo relatório do final de 2015 apresentado pelo REN21 refere que 76,3% da produção global de eletricidade ainda é por combustíveis fósseis e 23,7% por fontes renováveis. Estes 23,7% estão assim distribuídos: 16,6% hidrelétricas; 3,7% eólica; 2% bioenergia; 1,2% solar FV<sup>4</sup> e 0,4% outras fontes. Este impulso na produção de renováveis é mostrado na figura 2.1. Observa-se que no ano de 2015 houve um crescimento maior na produção de energias renováveis do que no período de 2010 a 2015, e que a energia solar, tanto a FV como a solar térmica concentrada<sup>5</sup> (*CSP - Concentrating Solar Power*) figuram com maior dinamismo de crescimento.

O gráfico mostra por exemplo que a energia eólica cresceu entre 2010 até o início de 2015 o mesmo que cresceu somente contabilizando o ano de 2015, ou seja 17%. Da mesma

---

<sup>4</sup> Energia solar FV – Conversão direta da energia solar radiante em energia elétrica de corrente contínua. (PINHO; GALDINO, 2014)

<sup>5</sup> Energia solar térmica concentrada – CSP - Conversão da energia solar radiante em energia térmica. (PINHO; GALDINO, 2014)

forma, a capacidade de produção da energia hidrelétrica, mesmo com o período de acentuadas secas, cresceu em 2015, mais do que no período de 2010 a 2015. E assim pode-se observar para todas as outras fontes de energia representadas (REN21, 2016).

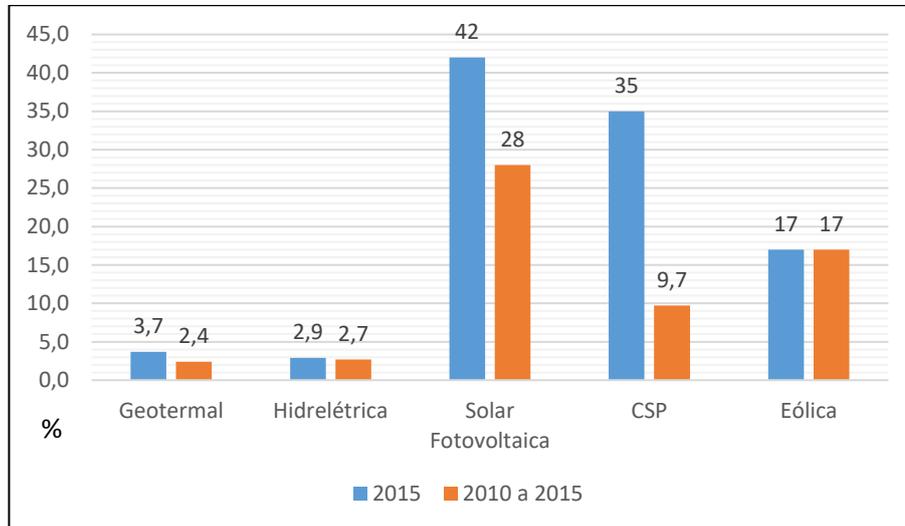


Figura 2.1- Aumento na capacidade (%) das energias renováveis - comparação entre o período de 2010 a 2015 e o ano de 2015.

Fonte: (REN21, 2016)

O relatório REN21 ainda aponta que os países com maior capacidade de produzir energia de fontes renováveis quando incluída a capacidade hidrelétrica são a China, os EUA, o Brasil, a Alemanha e o Canadá, como apresenta o quadro 2.1. A China só não ocupa o primeiro lugar nesta classificação quando se trata de energia geotérmica e bioenergia, classificação ocupada pelos EUA. A geração de energia solar e eólica tem como maiores produtores depois da China, a Alemanha, os EUA e o Japão. O Brasil figura como terceiro colocado, quando incluída a energia por hidrelétrica e quarto como produtor de energia via biocombustível.

Quadro 2.1 - Países com maior capacidade de produção de energia renovável – final de 2015.

Tipo de energia	1	2	3	4	5
Energia renovável (incluindo hidrelétrica)	China	EUA	Brasil	Alemanha	Canadá
Energia renovável (não incluindo hidrelétrica)	China	EUA	Alemanha	Japão	Índia
Bioenergia	EUA	China	Alemanha	Brasil	Japão
Geotermal	EUA	Filipinas	Indonésia	México	Nova Zelândia
Hidrelétrica	China	Brasil	EUA	Canadá	Repúblicas da Rússia
Solar -Fotovoltaica	China	Alemanha	Japão	EUA	Itália
Eólica	China	EUA	Alemanha	Índia	Espanha

Fonte: (REN21, 2016)

A produção de bioenergia e de energia geotérmica embora tenham aumentado em 2015, continuam enfrentando desafios devido a diminuição no preço dos derivados de petróleo e da insegurança de algumas políticas de mercado. A produção de etanol aumentou 4% em nível

global, tendo como principais origens os EUA e o Brasil, porém a produção global de biodiesel caiu devido a restrição em alguns mercados asiáticos. A Turquia foi líder na produção de energia geotérmica no ano de 2015 (REN21, 2016).

O mercado de energia solar FV cresceu 25% em relação a 2014 alcançando a capacidade mundial de 227 GW. China, Japão e Estados Unidos são os principais líderes do mercado, porém, o aumento do interesse por este tipo de energia fortaleceu a indústria da energia solar FV em outras partes do mundo, tornando-a mais competitiva. Estima-se que 22 países tinham no final de 2015 capacidade para atender mais de 1% de sua demanda de energia elétrica, com este tipo de energia, tendo quotas mais representativas em alguns países como Itália 7,8%, Grécia 6,5% e Alemanha 6,4%. A China atingiu 100% de eletrificação, em parte devido a instalação de energia solar FV em regiões que não estão ligadas a rede (REN21, 2016).

A energia eólica aumentou 63 GW alcançando 433 GW em 2015, o que representa um recorde global. A China e os EUA tiveram a energia eólica como principal fonte de nova capacidade de geração, mas novos mercados surgiram também em toda a África, Ásia e América Latina. Em alguns países como Dinamarca (42% da demanda em 2015), Alemanha (mais de 60% em quatro estados) e Uruguai (15,5% da demanda em 2015), a energia eólica está desempenhando um papel importante no atendimento da demanda e novas indústrias de equipamentos estão sendo implantadas em todo o mundo, embora o desafio ainda seja a falta de infraestrutura de distribuição (REN21, 2016).

Em relação à energia produzida através de hidrelétrica, 28 GW de capacidade foram adicionados, totalizando 1.064 GW, que alcançou 3.940 TWh de produção em 2015. Os seis países com maior capacidade (China, Brasil, EUA, Canadá, Rússia e Índia) representam 60,3% da capacidade global instalada como mostra a tabela 2.1.

Tabela 2.1- Países líderes na capacidade de produção através de hidrelétricas no final de 2015.

PAÍS	CAPACIDADE (GW)	PORCENTAGEM DE PRODUÇÃO GLOBAL (%)
China	296	27,9
Brasil	92	8,6
EUA	80	7,5
Canadá	79	7,4
Rússia	48	4,5
Índia	47	4,4
<b>Total</b>	<b>642</b>	<b>60,3</b>
<b>Resto do Mundo</b>	<b>422</b>	<b>39,7</b>

Fonte: (REN21, 2016)

O maior crescimento foi na China com adição de 16 GW, mas também Brasil, Turquia, Índia, Vietnã, Canadá, Malásia e Colômbia tiveram aumento na capacidade instalada. A China tem investido em grandes projetos, como o exemplo da obra das Três Gargantas, no rio Yangtzé, com capacidade de 22,5 GW, que entrou em operação no ano de 2014. Outro exemplo é o da usina de Wudongde, no rio Jinsha, na província de Yunnan, com capacidade de 10,2 GW que entrará em operação em 2020. Mas também tem atendido regiões remotas, com pequenas hidrelétricas, como no Tibete. O Brasil figura em segundo lugar no que diz respeito a novas instalações em 2015, o que será detalhado no tópico 2.1.2. A Turquia tem como meta alcançar 34 GW até 2023, para atender a demanda causada pelo crescimento da economia, sendo que com 2,2 GW de capacidade adicionada, finalizou 2015 com 25,9 GW. A Índia acrescentou 1,9 GW de capacidade, alcançando 47 GW no final de 2015, sendo que alguns projetos de novas usinas sofreram danos nos terremotos ocorridos em 2015, aumentando o déficit já existente. Os EUA continuam em terceiro lugar em capacidade instalada, porém no ano de 2015 acrescentou somente 70 MW em sua rede, totalizando 79,7 GW. O Canadá completou o ano de 2015 com um adicional de 0,7 GW instalado, chegando a 79 GW. A Rússia permanece em quinto lugar em capacidade instalada, somando 143 MW em 2015, totalizando 47,9 GW, com atenção especial à modernização de suas hidrelétricas para melhorar a eficiência, confiabilidade e segurança (REN21, 2016).

Embora a capacidade instalada tenha tido um crescimento significativo em 2015, alguns países como Brasil, Índia, Turquia e EUA, sofreram um decréscimo na produtividade devido a secas mais prolongadas. Este desafio fez crescer o interesse pela combinação da energia hidrelétrica com a eólica e a solar (REN21, 2016).

Nesta breve apresentação de estatísticas, observa-se que existe uma preocupação global com a produção de energia de fontes renováveis levando a esforços consideráveis para que nos próximos anos os resultados se apresentem promissores. Porém a maior parte dos países ainda utiliza combustíveis fósseis como matéria prima, exigindo que acordos como o realizado no encontro de Paris em dezembro de 2015 sejam respeitados e apresentem estatísticas cada vez mais positivas.

### **2.1.2 Cenário no Brasil**

Dados divulgados pelo Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro (MME, 2016), apontam que o Brasil atingiu em janeiro de 2016, 141.684 MW de potência instalada, registrando um crescimento de 5,7% em relação a janeiro de 2015. Deste

total, 65% foram através de hidrelétricas; 29,4% por termelétricas (UTE) e 5,6 % por usinas eólicas (EOL) como mostra a tabela 2.2.

Tabela 2.2- Matriz da capacidade instalada da geração elétrica no Brasil.

Fonte	jan/15 Capacidade instalada (MW)	jan/16			
		Número de usinas	Capacidade instalada (MW)	% de capacidade instalada	Adicional na capacidade instalada (%)
<b>UHE</b>	89.227	1.220	92.100	65	3,2
<b>UTE</b>	39.786	2.916	41.595	29,4	4,5
Gás natural	12.776	149	12.439	8,78	-2,6
Petróleo	9.085	2.192	10.124	7,15	11,4
Carvão	3.593	22	3.612	2,6	0,5
Nuclear	1.990	2	1.990	1,4	0
Outras	0	31	153	0,11	-
<b>EOL</b>	4.981	330	7.968	5,6	60
<b>UFV</b>	15	34	21	0	40,6
<b>TOTAL</b>	<b>134.009</b>	<b>4.500</b>	<b>141.684</b>	<b>100</b>	<b>5,7</b>

Fonte: Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro (MME, 2016).

Pela porcentagem de adicional na capacidade instalada, pode-se observar que houve um crescimento significativo na matriz eólica, que em janeiro de 2015 tinha a capacidade de 4.981 MW, alcançando no mesmo mês do ano seguinte 7.968 MW. Da mesma forma a usina fotovoltaica (UFV) que teve um acréscimo de 40,6% em sua capacidade instalada. Porém, a quantidade de MW instalados destas formas de produção ainda é pequeno se comparados aos das usinas hidrelétricas e térmicas.

Embora a capacidade instalada tenha apresentado crescimento em quase todas as formas de geração, com exceção do gás natural, a produção de energia no Brasil não refletiu este crescimento. Acentuando-se a diminuição de -4,6% na produção hidráulica, -5,5% na produção das usinas térmicas (petróleo e derivados) e -3,7% das usinas nucleares, como mostra a tabela 2.3. A produção de EOL, em contrapartida registrou crescimento acumulado no ano de 2015 de 84,1%. Os dados da tabela 2.3 são referentes a produção de energia que está interligada ao Sistema Interligado Nacional (SIN)<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> SIN - Sistema Interligado Nacional, sistema de geração e transmissão de energia no Brasil. Devido as suas características, predominantemente hidrométrico e de grande porte, pode ser considerado único em âmbito mundial. Abrange as cinco regiões do país (ONS, 2016).

Tabela 2.3 - Matriz de produção de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Fonte	Acumulado 12 meses		
	dez/13 a nov/14 (GWh)	dez/14 a nov/15 (GWh)	Evolução (%)
<b>UHE</b>	391.104	373.185	-4,6
<b>UTE</b>	134.729	140.011	3,9
Gás Natural	59.909	64.067	6,9
Carvão	15.026	15.893	5,8
Petróleo	25.044	23.663	-5,5
Nuclear	14.069	13.554	-3,7
Biomassa	20.681	22.834	10,4
<b>EOL</b>	11.137	20.507	84,1
<b>UFV</b>	5,92	17,42	194,25
<b>TOTAL</b>	<b>536.976</b>	<b>533.720</b>	<b>-0,6</b>

Fonte Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro (MME, 2016).

Até o ano de 2015; 1,7% da energia requerida pelo país encontrava-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (ONS, 2016). Esta estatística apresentou uma queda devido a interligação do sistema elétrico do Amapá e de Manaus ao SIN. A tabela 2.4 apresenta a matriz de produção dos sistemas isolados.

Tabela 2.4 – Evolução da matriz de produção de energia elétrica de sistemas isolados.

Fonte	Acumulado 12 meses		
	dez/12 a nov/14 (GWh)	dez/14 a nov/15 (GWh)	Evolução (%)
<b>Hidráulica</b>	1.945	886	-54,4
<b>Térmica</b>	10.687	5.886	-44,9
Gás Natural	4.635	1.999	-56,9
Petróleo	6.052	3.887	-35,8
<b>TOTAL</b>	<b>12.632</b>	<b>6.772</b>	<b>-46,4</b>

Fonte: Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro (MME, 2016).

(\*) Em petróleo estão consideradas as usinas a óleo diesel, a óleo combustível e as usinas bicombustíveis.

O SIN através do ONS é responsável pela coordenação dos serviços de energia elétrica no Brasil e é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Este sistema permite as diferentes regiões permutarem energia, interligando as usinas geradoras, na maioria hidrelétricas, localizadas longe dos centros consumidores. A distância geográfica e as variações climáticas no Brasil ocasionam ora escassez, ora excedente de produção elétrica em algumas regiões e períodos do ano, por isso a importância da interligação, que viabiliza o intercâmbio de energia, reduzindo custos de operação.

A figura 2.2 apresenta o mapa de integração da rede de energia, onde se observa que as bacias hidrográficas localizadas ao longo do território são as principais fontes de energia sendo

responsáveis pela produção para os centros mais desenvolvidos. As linhas pretas indicam uma ligação de 750 kV, as vermelhas de 500 kV, as roxas de 440 kV, as azuis de 345 kV e as verdes de 230 kV. As linhas pontilhadas representam instalações futuras da rede, mostrando a necessidade de expansão do SIN, para atender a demanda.

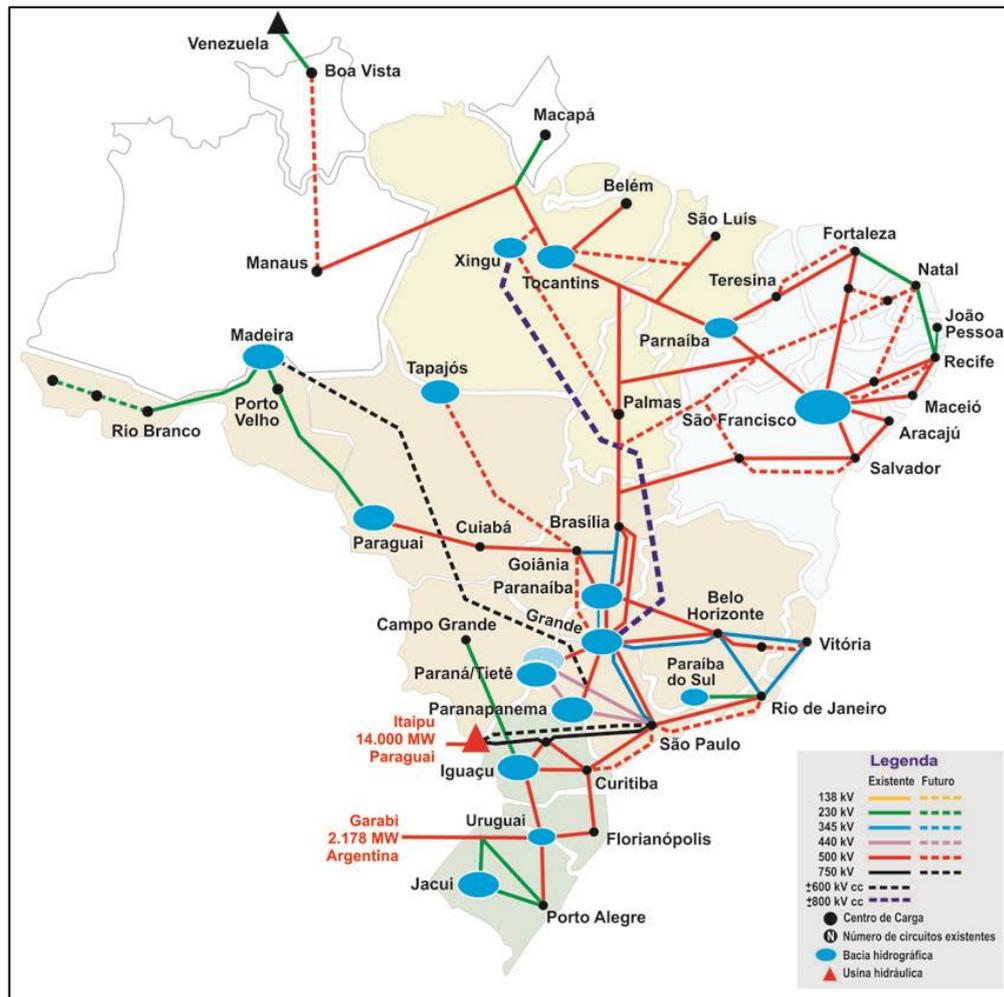


Figura 2.2 - Mapa da interligação da rede de energia pelo SIN.  
Fonte: (ONS, 2016)

O mapa mostra também que os países vizinhos (Argentina, Uruguai, Paraguai e Venezuela) estão ligados ao SIN. Segundo informações da ANEEL, no Boletim de Informações Gerenciais (ANEEL, 2016a), o Brasil tem um contrato de importação 5.650 MW de energia do Paraguai e 200 MW da Venezuela. E os dados divulgados em janeiro de 2016 pelo Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro (MME, 2016), apontam que no mês de janeiro de 2016 o Brasil exportou 21 MW médios<sup>7</sup> de excedente para Argentina e importou do Uruguai

<sup>7</sup> MW médio - Unidade de produção energética igual a energia produzida pela operação contínua de um megawatt de capacidade durante um período de tempo. O MW médio é calculado por meio da razão MWh/h, onde MWh representa a energia produzida e h representa a quantidade de horas do período de tempo no qual a referida quantidade de energia foi produzida (ANEEL, 2016)

18 MW médios. A importação da Venezuela para suprir o estado de Roraima chegou a 125 MW médios.

#### 2.1.2.1 O ano de 2015 e a projeção para expansão da geração elétrica no Brasil

Em relação a expansão da geração de energia, o Relatório de Acompanhamento da Implantação de Empreendimentos de Geração (ANEEL, 2016c) aponta que em 2015 foram acrescentados 6.428 MW de potência instalada, representando o segundo maior valor agregado nos últimos 11 anos, ficando abaixo somente do ano de 2014 que obteve 7.509 MW adicionados. Ao longo de 2015, as EOLs foram as mais representativas, chegando ao acréscimo de 2.655 MW, superando as demais fontes (UHE, UTE e outras). As UHEs também contribuíram de forma substancial para expansão do parque gerador em 2015, sendo adicionados 2.299 MW. Em menor projeção, mantendo praticamente estável o crescimento do ano anterior, estão as UTEs com 1.356 MW.

A previsão de entrada em operação de novas usinas de 2016 até 2023 está especificada na tabela 2.5, conforme o Boletim de Informações Gerenciais (ANEEL, 2016a).

Tabela 2.5 – Aumento projetado de capacidade instalada (MW).

Tipo de usina	2016	2017	2018	2019	2020	2021-2023	Sem previsão ***	Total
EOL	2.281	2.856,10	3.026	1.217	-	-	403,2	9.783,20
UHE	4.865,40	4.461,10	4.782,30	2.015,30	-	-	1.018,20	17.142,20
PCH	123,7	312,2	1.149,50	238,4	85,2	7,5	371,6	2.288,10
UTE	1.563,80	728,9	1.156,70	3.155	2.995,60	-	3.496,80	13.096,80
UFV	-	-	1.173	-	-	-	-	1.173
<b>TOTAL</b>	<b>8.833,90</b>	<b>8.358,20</b>	<b>11.287,30</b>	<b>6.625,60</b>	<b>3.080,80</b>	<b>7,5</b>	<b>5.289,80</b>	<b>43.483,30</b>
Sem restrição	8.706,10	6.423,60	5.498,20	1.833,30	25	-	-	22.486,10
Com restrição *	127,9	1.934,70	5.789,1	4.792,30	3.055,80	7,5	-	15.707,30
Com graves restrições **							5.289,80	5.289,80

Fonte: Boletim de Informações Gerenciais (ANEEL, 2016a).

\*Existem impedimentos para entrada em operação

\*\*As graves restrições para entrada em operação referem-se a: suspensão do processo de licenciamento ambiental, demandas judiciais, declaração de inviabilidade ambiental do empreendimento, entre outras.

\*\*\*Usinas sem previsão são aquelas suspensas pelas restrições acima, que estejam com processo de revogação em análise ou que apresentam problemas impeditivos à sua implantação.

Entre 2016 e 2021 há 38.186 MW de potência a ser acrescida ao sistema. Além deste montante há usinas em processo de licenciamento ambiental que totalizam 15.707,3 MW e as que possuem graves impedimentos que totalizam 5.289,8 MW sem previsão de entrada em

operação. Destas 3.496,8 MW são de UTEs, 1.018,2 são de UHEs, 403,7 MW são de EOL e 371,6 MW são de PCHs.

Estes números novamente mostram que as EOLs estão com forte tendência a se firmarem, aumentando a diversidade da matriz energética brasileira, podendo-se considerar o país como um cenário cada vez menos dependente de energia externa, bem como capaz de se manter como um dos países com menos emissões provenientes da produção de energia.

#### 2.1.2.2 O ano de 2015 e a projeção de demanda de energia no Brasil

Referente ao consumo de energia no ano de 2015 os registros do Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro (2016) apontam uma queda de 1,7% em relação a 2014, mostrando um cenário diferente do previsto pelo (BRASIL/MME, 2007), como mostram os dados da tabela 2.6, que previa um aumento de aproximadamente 5,1% ao ano até 2030. Neste cenário o setor industrial seguiria como principal segmento de consumo e no segmento residencial, poderia se atribuir o aumento do consumo, ao crescimento do nível de renda e à melhoria na sua distribuição, chegando a aproximadamente 1200 kWh por habitante, valor esse ainda inferior aos parâmetros internacionais.

Tabela 2.6 – Projeção da produção e consumo de eletricidade para 2030.

	Unidade	2005	2030
<b>PIB</b>	US\$ bilhões	796,3	2133,2
<b>População</b>	Milhões de habitantes	185	239
<b>Renda per capita</b>	US\$ por hab	4330	8925
<b>Produção de Eletricidade</b>			
Geração hidrelétrica	TWh	335,7	817,6
Geração a gás natural	TWh	13,9	92,1
Centrais nucleares	TWh	9,9	51,6
Centrais eólicas	TWh	0,1	10,3
Cogeração biomassa de cana	TWh	0	33,5
<b>Total</b>	<b>TWh</b>	<b>441,9</b>	<b>1197,6</b>
<b>Consumo de eletricidade</b>			
Consumo residencial	TWh	83,2	283,3
Consumo industrial	TWh	175,4	455,5
<b>Total</b>	<b>TWh</b>	<b>375,2</b>	<b>1032,7</b>
Consumo de eletricidade per capita	KW/hab	452	1188

Adaptado do Plano Nacional de Energia – 2030 (BRASIL/MME, 2007).

Porém, no ano de 2015 ocorreu uma retração no crescimento no Brasil. Esta queda se deve a dois fatores principais: aumento das tarifas energética e cenário econômico desfavorável. Fatores estes que desencadearam uma desaceleração no mercado residencial pela primeira vez

desde o período do racionamento de energia (2001-2004). Nos anos seguintes (2004-2014), o consumo médio residencial cresceu aproximadamente 2% ao ano e em 2015 houve uma reversão deste crescimento. Em relação ao mercado industrial houve uma queda de 5,3% no consumo em 2015, devido a retração das atividades industriais. Apenas a região nordeste foi responsável pelo aumento do consumo nas atividades comerciais, que registrou crescimento regional em 4,3% (ANEEL, 2016a).

### 2.1.2.3 As hidrelétricas e o seu papel na produção de energia no Brasil

O Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, com alcance de 75,2% no final de 2015, contra 24,8% de não renovável. A energia hidráulica destaca-se com participação de 71,1%. A energia eólica representa 3,7 % e a térmica, por biomassa 1,2% (ANEEL, 2016a).

Mesmo com estes números, pode-se afirmar que houve uma redução na participação de hidrelétricas, se considerarmos as previsões do Plano Nacional de Energia - 2030 (BRASIL/MME, 2007), que já apresentava uma estatística de retração: “Com relação às fontes de produção, a energia hidráulica continuará liderando, porém com diminuição na sua participação na matriz elétrica de 90% em 2005 para 75% em 2030”. Já no ano de 2015, a participação é de 71,1%. Isto se deve principalmente a necessidade de diversificar a matriz energética brasileira, a dificuldade em ofertar novos empreendimentos hidráulicos pela ausência de estudos e inventários, e o aumento de entraves jurídicos que dificultam o licenciamento ambiental de hidrelétricas. “Os maiores entraves à expansão hidrelétrica no país são de natureza ambiental e judicial, e os atrasos nas obras ou licenciamentos, são por conta dos argumentos dos opositores”. (ELETROBRAS, 2013). O impacto na vida da população, na flora e fauna locais são as principais consequências referidas, além de questão legal que cita o problema do uso de terras indígenas, para construção das grandes usinas e também os custos para as linhas de transmissão.

Não há, porém, divergências em afirmar que o Brasil está entre os cinco maiores países do mundo no que se refere ao potencial de aproveitamento hidráulico. Os outros são: China, Rússia, Canadá e EUA. Conforme Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT/2015 (ELETROBRAS, 2015), o Brasil possui 247.465 MW de potencial hidráulico,

que representa o resultado da soma da parcela estimada<sup>8</sup> com a inventariada<sup>9</sup>. Deste total 94.125 MW estão em operação e 13.949 MW estão em construção, o que se somados totalizam 108.074 MW que representam menos da metade do potencial referido. Ao subtrairmos do potencial total a soma do potencial em operação e em construção, teremos como potencial a ser explorado, cerca de 139.390,3 MW.

A tabela 2.7 apresenta os 6 estados com maior potencial hidrelétrico do Brasil, especificando o valor total do potencial hidrelétrico, o valor que já está em operação e o que está sendo construído.

Tabela 2.7– Cinco estados com maior potencial hidrelétrico brasileiro

UF	Em operação (MW)	Em construção (MW)	Soma (MW) Operação + Construção	TOTAL DO POTENCIAL (MW)
PA	9.597,50	11.583,10	21.180,60	51.012,02
PR	16.015,70	394,02	16.409,72	24.087,13
MG	12.638,04	132,15	12.770,19	23.992,07
MT	2.844,77	1.221,44	4.066,21	20.974,62
AM	250	0	250	20.238,43
SP	11.086,92	0	11.086,92	15.214,97
<b>TOTAL</b>	<b>52.432,93</b>	<b>13.330,71</b>	<b>65.763,64</b>	<b>155.519,24</b>

Fonte: (ELETROBRAS, 2015)

Observa-se que estes seis estados concentram 62,84% (155.519,24 MW) dos 247.465,01 MW do potencial total de aproveitamento hidráulico. E tem-se os estados do Pará e Amazonas com um grande potencial ainda a ser explorado (49.819,85 MW), colocando a região norte como um grande foco de implantação de hidrelétricas. Os estados do Paraná, Minas Gerais e São Paulo destacam-se no que se refere a potencial já em operação; e o estado do Mato Grosso segue a característica dos estados do Pará e Amazonas, também com significativo potencial a ser explorado.

### 2.1.3 Cenário na Amazônia

Os estados que fazem parte da Amazônia Legal (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, Mato Grosso e Maranhão),

<sup>8</sup> Parcela estimada – Somatória dos estudos da parcela remanescente com a parcela individualizada. Parcela remanescente é aquela realizada em escritório, com dados já existentes, sem qualquer levantamento complementar. A parcela individualizada resultado de estimativa realizada em escritório para um determinado local, a partir de dados existentes ou levantamentos expeditos, porém sem levantamento detalhado.

<sup>9</sup> O potencial inventariado - Resultante da somatória dos aproveitamentos: apenas em inventário, com estudo de viabilidade, com projeto básico, em construção e em operação (ELETROBRAS, 2015).

tem a hidrelétrica como principal fonte de energia, sendo que em alguns estados a termelétrica também tem contribuição significativa para atendimento da demanda. O parque gerador desta região está sob o comando da Eletrobrás Eletronorte e da Eletrobrás Amazonas.

Fazem parte do parque gerador Eletrobrás Eletronorte as hidrelétricas de Tucuruí, Samuel, Coaracy Nunes e Curuá-Una, totalizando a capacidade de geração de 8.694,3 MW. Complementam a geração as termelétricas de Rio Acre, Rio Branco I, Rio Branco II, Santana, Rio Madeira e Floresta, com capacidade de geração de 438 MW, como mostra a tabela 2.8, totalizando 9.132,3 MW considerando os dois conjuntos de geração (hidrelétrica e termelétrica) (ELETROBRAS ELETRONORTE).

Tabela 2.8 – Parque gerador Eletrobrás Eletronorte.

UF	Hidrelétrica	Capacidade (MW)	Termelétrica	Capacidade (MW)
AC			Rio Acre	45
			Rio Branco I	18,6
			Rio Branco II	31,8
AP	Coaracy Nunes (Rio Araguari)	78,00	Santana	134,77
PA	Tucuruí (Rio Tocantins)	8.370,00		
	Curuá-Una (Rio Curuá-Una)	30,30		
RO	Samuel (Rio Jamari)	216,00		
RR			Rio Madeira	121,9
			Floresta	85,93
<b>TOTAL</b>		<b>8.694,30</b>		<b>438,00</b>

Adaptado de Eletrobrás Eletronorte. (ELETROBRAS ELETRONORTE)  
<http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/parqueGerador/>

Os relatórios disponíveis da Eletrobrás Eletronorte ainda não incluíram em suas estatísticas as UHEs que entraram em operação no último ano. Por isto, não estão contabilizadas nesta estatística, a UHE de Jirau, com 1.275 MW já em operação desde 2015, de um total de capacidade de 3.750 MW e a UHE de Santo Antônio com 212 MW do total de 3.568 MW a serem instalados. As duas UHEs estão localizadas no rio Madeira, estado de Rondônia. A UHE de Cachoeira Caldeirão situada no rio Araguari no estado do Amapá, já está em operação com 73 MW dos 219 MW totais de capacidade, da mesma forma a UHE e Ferreira Gomes com 84 MW em operação (Relatório de Acompanhamento da Implantação de Empreendimentos de Geração, 2016). A UHE de Belo Monte também sob a gestão da Eletronorte, localizada no rio Xingu, iniciou a operação da primeira turbina em 17 de fevereiro, disponibilizando a potência de 611,11 MW. As 24 turbinas serão operacionalizadas até 2019, totalizando 11.000 MW de potência instalada.

Sob a responsabilidade da Eletrobrás Amazonas estão o Sistema Manaus e o Sistema Interior, como apresenta a tabela 2.9. O parque do Sistema Manaus atende a capital do estado e os municípios de Iranduba e Presidente Figueiredo e é composto pela hidrelétrica de Balbina e Electron e as Usinas Térmicas de Aparecida, Mauá, Cidade Nova, São José e Flores. Para completar a demanda do mercado a Eletrobrás Amazonas compra energia de produtores independentes, como as termelétricas: a Breitner Tambaqui, a Breitner Jaraqui, a Manauara, a Rio Amazonas e a GERA<sup>10</sup>. O Sistema Interior atende aos demais municípios com uma potência de 383 MW. O parque elétrico amazonense é o único que não está totalmente interligado pelo SIN.

Tabela 2.9 – Parque gerador Eletrobrás Amazonas.

	<b>Hidrelétrica</b>	<b>Capacidade (MW)</b>	<b>Termelétrica</b>	<b>Capacidade (MW)</b>
<b>Sistema Manaus</b>	Balbina (Rio Uatumã)	250,00	Aparecida	172
	Electron	120,00	Mauá	436,5
			Cidade Nova	15,4
			São José	36,4
			Flores	69
<b>Sistema Interior</b>		383,00		
<b>TOTAL</b>		<b>753,00</b>		<b>729,30*</b>

\*Não está incluída a compra de energia das usinas termelétricas de produtores independentes

Adaptado de Eletrobrás Amazonas. (Eletrobrás Amazonas)

<http://www.eletobrasamazonas.com/cms/empresa/mercado-de-energia/>

O estado do Pará tem a demanda de 99% atendida pelas usinas de Tucuruí e Curuá-Una. Construída em duas etapas, Tucuruí tem potência instalada de 8.370 MW. As obras da primeira casa de força – com 12 unidades geradoras de 350 MW, duas auxiliares de 22,5 MW e potência instalada de 4.245 MW - foram concluídas em dezembro de 1992. Em junho de 1998, foi iniciada a construção da segunda casa de força, com 11 unidades geradoras de 375 MW e potência instalada total de 4.125 MW, concluída em abril de 2007. Curuá-Una, localizada a 70 km da cidade de Santarém-PA, com capacidade de 30,3MW, atende parcialmente a demanda da cidade, servindo como complemento da UHE de Tucuruí.

Os estados do Mato Grosso, Maranhão e Tocantins fazem parte da Amazônia Legal. A energia consumida no estado do Mato Grosso é gerada por usinas hidrelétricas e termelétricas, e o excedente é exportado para o SIN. Em ocasiões inversas, o estado recebe energia gerada pelo sistema de Furnas. No Maranhão a Eletrobrás atende 99% da demanda do estado através da usina de Tucuruí. No Tocantins, a Hidrelétrica de Tucuruí é a principal produtora de energia,

<sup>10</sup> GERA – Empresa geradora termelétrica, localizada no estado do Maranhão, com capacidade de 330 MW. (<http://www.geramaranhao.com.br/>)

mas como o estado fica no centro da interligação do sistema, também recebe energia de outras regiões.

Segundo dados do Atlas de Energia Elétrica no Brasil (ELETRONORTE, 2013), boa parte do potencial hidráulico nas regiões mais desenvolvidas já foi aproveitada, portanto espera-se um crescimento da capacidade utilizando-se o potencial principalmente da bacia Amazônica e da bacia Tocantins/Araguaia, que possuem o maior potencial hidrelétrico do país. A concentração de usinas nestas regiões não é somente pelas condições geográficas. Outro fator que contribuiu para esta distribuição, foi o desenvolvimento inicial das hidrelétricas nas regiões sul, sudeste e nordeste, esgotando o potencial em alguns locais como é o caso da Bacia do São Francisco na Bahia.

Considerando-se o que foi exposto, pode-se observar que países como a China e o Brasil possuem maior parte de sua matriz energética com origem renovável, sendo a principal fonte a energia hidráulica. Ainda foi demonstrado que o Brasil está entre os países com maior parque hidrelétrico e potencial de crescimento para este tipo de produção de energia, porém tendo ainda a termelétrica como a opção mais frequente quando a demanda não é atendida pelas hidrelétricas. No ano de 2015, observou-se o crescimento das EOLs, o que mostra o engajamento do Brasil na busca por atingir metas de atendimento à demanda, diversificando sua matriz energética e aumentando a segurança no abastecimento.

## 2.2 USINAS HIDRELÉTRICAS: ASPECTOS AMBIENTAIS

Conforme o recurso utilizado para gerar energia, as usinas são classificadas em: usinas que utilizam recursos renováveis (eólica, solar, marítima, hidráulica, etc.) e as que utilizam recurso não renováveis (petróleo, gás, carvão mineral, etc.). A tecnologia de produção de energia que utiliza recursos renováveis que será objeto de estudo nesta pesquisa é a hidráulica. Com objetivo de contextualizar o tema sobre os aspectos ambientais da implantação de hidrelétricas, apresenta-se alguns fatores importantes sobre as emissões de GEEs de hidrelétricas e um breve relato de alguns trabalhos relacionados com esta discussão. Ressalta-se que esta é uma abordagem com o objetivo de contextualização e não será assunto aprofundado neste trabalho.

As emissões produzidas pela geração de energia são classificadas de duas formas: indiretas e diretas. As primeiras são as emissões provocadas pela construção, implantação e desativação da usina, que conforme Steinhurst, Knight e Schultz (2012), incluem infraestrutura de estradas e linhas de transmissão, trabalhos de implantação, manufatura de materiais,

transporte, descarte de matéria prima, etc. De acordo com Dones *et al.* (2007), o maior contribuinte para emissão de GEEs nesta categoria inclui a produção de cimento e o uso do diesel para eletricidade. Raadal *et al.* (2011) afirmam que “o maior fator contribuinte relacionado à infraestrutura para emissão de GEEs é a produção de concreto e o transporte de pedras para a construção das barragens e túneis”. As emissões indiretas podem representar menos que 20% das usinas geradoras que utilizam combustível fóssil e mais que 90% das usinas geradoras por fontes renováveis e nuclear (STEINHURST, KNIGHT e SCHULTZ, 2012).

E as emissões diretas são aquelas resultantes da fase em que a usina está em operação, como queima de combustível utilizado para funcionamento da usina, uso da terra/área alagada, bens e serviços para operação da usina, etc. Em relação à emissão direta produzida pelas hidrelétricas a decomposição da biomassa do solo inundado do reservatório é das mais significativas (RAADAL *et al.*, 2011).

Os impactos causados por estas emissões são classificados conforme a abrangência da área que afetam em: impacto global, impacto regional e impacto local, ou seja, alguns podem ter significativo impacto em uma região, mas não em outra. Por exemplo, aquecimento global, diminuição da camada de ozônio, recursos bióticos e abióticos provocados pelas emissões de um determinado local, podem provocar impactos globais; já o uso da terra será responsável por impactos locais. (ISO, 1997).

A hidrelétrica é uma fonte de energia renovável não totalmente limpa, pois se considerado todo o seu ciclo de vida, tem contribuições diretas e indiretas na produção de GEEs. Alguns estudos (GALY-LACAUX *et al.*, 1999; ABRIL *et al.*, 2005; FEARNESIDE, 2005; FLURY e FRISCHKNECHT, 2012; STEINHURST; KNIGHT e SCHULTZ, 2012; DUCHEMIN *et al.*, 2000; FARIA *et al.*, 2015 entre outros) apresentam a preocupação de mostrar que a ideia de que as usinas hidrelétricas têm baixos níveis de emissões, é de certa forma equivocada. Argumentam que as emissões podem às vezes superar as de usinas que utilizam matéria prima não renovável, como combustíveis fósseis em sua fase de implantação e em alguns casos também na fase de operação, como descrevem os trabalhos de Fearnside (2005) e Faria *et al.* (2015).

As emissões produzidas pelas hidrelétricas sofrem influência de muitos fatores e avaliar os danos ambientais causados por esta forma de geração se constitui em um trabalho complexo (AZAPAGIC, 1999). Características como a forma de aproveitamento da água (a fio d'água, com reservatório, ou por bombeamento), localização e clima, tipo de vegetação, tempo de

operação, tamanho e profundidade do reservatório, área de deplecionamento<sup>11</sup>, são exemplos de características com forte influência no que se refere às medidas das emissões, como descrevem os autores:

Galy-Lacaux *et al.*, (1999) realizaram um estudo na hidrelétrica de Petit Saut, na Guiana Francesa, para medir as emissões dos principais GEEs (metano e dióxido de carbono), na área do reservatório na fase de enchimento e nos três primeiros anos de operação. Dentre as observações feitas no final do estudo está que as emissões produzidas pelos reservatórios tropicais não devem ser negligenciadas como contribuintes para o aquecimento global. Contudo, para comparar as emissões de hidrelétricas com outras fontes de energia é preciso levar em conta vários fatores dentre eles a taxa de emissão por unidade de energia produzida, para definir se é a melhor opção.

De acordo com Fearnside (2005), Flury e Frischknecht, (2012), as usinas com reservatório possuem uma contribuição significativa para as emissões, principalmente nos 10 primeiros anos da operação da usina. Usinas que estão localizadas em clima tropical devem ser avaliadas de forma particular, e poucos estudos existem considerando este contexto. O bioma que compõe a área inundada, também contribui para maior ou menor produção dos gases metano e carbônico. Em relação ao tamanho e profundidade, as emissões são maiores em reservatórios extensos e rasos (FEARNSIDE, 2005). Em relação ao tempo de operação, há um consenso das pesquisas que afirmam que as emissões diminuem conforme o tempo.

Já Raadal *et al.*, (2011), citam que as medições de GEEs com origem na área inundada podem estar sendo referenciadas de forma equivocada, pois não representam a quantidade líquida de emissões<sup>12</sup>. Fearnside (2008) afirma que ao avaliar emissões de represas hidrelétricas deveria ser um princípio básico contar todas as fontes e sumidouros.

Steinhurst, Knight e Schultz (2012) realizaram uma pesquisa para responder a questão de como a energia hidrelétrica se comporta em relação a outras tecnologias nas emissões de gás de efeito estufa (GEE), incluindo as emissões do ciclo de vida da construção e operação. Chegaram a conclusão de que a energia hidrelétrica emite GEEs, mas a taxa de emissões por

---

<sup>11</sup> Deplecionamento - Redução do nível da água em uma área, como consequência das oscilações do regime hídrico ao longo do ano. A variação sazonal resulta em áreas com excesso ou debilitação de recursos, que dificulta a integridade do ecossistema local. ([www.cemac.ufla.br](http://www.cemac.ufla.br))

<sup>12</sup> Quantidade líquida de emissões – É a diferença entre a quantidade de emissões medidas após o alagamento subtraída da quantidade de emissões medidas antes da área ser inundada.

unidade de geração de energia (excluindo reservatórios tropicais<sup>13</sup>) é muito inferior ao das tecnologias de combustíveis fósseis. Apontam que as maiores fontes de emissões de GEEs pelas hidrelétricas são a construção das instalações, e a decomposição da biomassa da inundação do reservatório, que depende do local (clima tropical ou boreal) e do bioma inundado (rios mais velhos ou mais novos, zonas úmidas ou secas, floresta ou cerrado, etc).

Para usinas hidrelétricas, a decomposição da biomassa no solo e o bioma da terra recém inundada pelo reservatório da usina emitem gases de efeito estufa que se difundem através da água do reservatório e para a atmosfera. Essa liberação de gases de efeito estufa devido a decomposição da biomassa é a maior fonte de emissões diretas de GEE para hidrelétrica (STEINHURST; KNIGHT; SCHULTZ, 2012).

Faria *et al.* (2015) investigaram, através de simulação, 18 reservatórios de projetos em construção ou recém construídos em oito rios da Amazônia usando duas abordagens, a primeira mede diretamente o fluxo de carbono para atmosfera dos reservatórios e rios, e a segunda baseia-se no potencial de emissão oriunda da inundação da área degradada. Embora considerem que há uma grande dificuldade de realizar estas medições, devido a falta de modelos preditivos, os resultados mostraram que a construção de grandes hidrelétricas na Amazônia pode resultar em um aumento dos GEE e sugerem que dois fatores contribuem para a redução das emissões globais a partir destes reservatórios: alta densidade de energia, isto é, a razão entre a potência instalada e área inundada, e limpeza de vegetação.

O desafio de avaliar as emissões de GEE devido à criação de reservatórios é complexa, por causa da alta variabilidade espacial e temporal e os múltiplos fatores que podem interferir na produção, consumo e nas emissões de gases de efeito estufa de reservatórios tropicais (FARIA *et al.*, 2015).

Tancredi e Abbud (2013) trazem à tona a discussão sobre o baixo aproveitamento do potencial hidrelétrico existente na Amazônia, quando da opção pelas hidrelétricas a fio d'água<sup>14</sup>, que tem menores custos e menos problemas para licenciamento ambiental, porém tornando a produção suscetível à instabilidade das chuvas. Argumentam que:

...o potencial hidrelétrico existente na Amazônia constitui riqueza inigualável e insubstituível, que pode beneficiar toda a população brasileira – indígenas inclusive – com energia elétrica limpa e barata. A alternativa é a situação que estamos vivendo atualmente, com a segurança do abastecimento sendo suportada por geração térmica cara e poluente, usinas que vêm sendo pagas para ficarem paradas (ao menos, até então) a maior parte do tempo (TANCREDI e ABBUD, 2013).

Muitas discussões como estas apresentadas acima estão tratando as questões ambientais ligadas a implantação de hidrelétricas. Como pode se observar, os argumentos são diversos e

---

<sup>13</sup> Reservatórios tropicais são aqueles que estão situados entre o Trópico de Câncer e o Trópico de Capricórnio, tendo a faixa de latitude entre 23.5° N e 23.5° S respectivamente.

<sup>14</sup> Hidrelétrica a fio d'água - Esse tipo de PCH é empregado quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista. Não há reservatório (ELETROBRAS, 2013)

com pontos divergentes. Por um lado, há que se utilizar o potencial hidrelétrico para suprir as necessidades e dar segurança no que se refere à energia elétrica, por outro, existem questões ambientais que sequer foram mensuradas, provocando confronto de opiniões. O que há de comum nesta discussão é a necessidade de estudos aprofundados, criteriosos e detalhados para cada situação, com o objetivo de conhecer melhor os dois lados desta discussão.

### 2.3 TRABALHOS RELACIONADOS: ACV NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

A metodologia utilizada na pesquisa, descrita detalhadamente no capítulo 3, está fundamentada nos princípios e práticas da ACV, seguindo as fases propostas pela ISO 14040. (ISO, 1997). Porém, há uma ampla diversidade de abordagens e discussões sobre a metodologia, os padrões, a aplicabilidade, as vantagens e as restrições de seu uso, relatórios de resultados da aplicação da ACV nos diversos contextos, como as relatadas em Ribeiro (2004); Matuszewska (2011); Tsang, Sonnemann e Bassani (2016); Turconi, Boldrin e Atrup (2014); Flury e Frischknecht, (2012); Dones *et al.*, (2007); García-Valverde, Cherni e Urbina (2010), Desideri *et al.*, (2012); Laleman, Albrecht e Dewulf (2011); Brizmohun, Ramjeawon e Azapagic (2015) e Pang *et al.* (2015), dentre outros. A seguir alguns destes trabalhos relacionados estão resumidamente descritos, com o objetivo de apresentar as diferentes formas de aplicar a ACV no contexto energético.

Ribeiro (2004) desenvolveu um trabalho para criar bases brasileiras para ACV, sendo dedicado especificamente à geração de eletricidade, adotando como campo de estudo a Hidrelétrica de Itaipu. Estudou os aspectos da usina quanto à sua obra civil e consumo de insumos na construção e operação por 100 anos, obtendo ao final o ICV com os aspectos ambientais mais significativos em termos da energia gerada. O prosseguimento do Processo de ACV, ou seja, a etapa de AICV foi apresentado em Ribeiro e Silva (2010), que registrou que os maiores danos ambientais estão relacionados ao enchimento do reservatório, aos insumos cimento e aço e também ao uso de máquina para operação da usina.

Matuzsewka (2011) propôs integrar a ACV com um modelo termo econômico para usinas geotérmicas na Suíça e Polônia. O objetivo foi maximizar eficiência da exergia<sup>15</sup> de um sistema de conversão geotérmico e minimizar os impactos gerados ao longo do seu ciclo de vida. A conclusão da pesquisa registra que as fases de construção e decomissionamento são as de maior influência no impacto ambiental.

---

<sup>15</sup> Exergia – Método que utiliza a conservação de massa com princípios da conservação da energia, considerando a segunda Lei da Termodinâmica, para análise, projeto e melhorias de outros sistemas.(DINCER; ROSEN, 2013)

Tsang, Sonneman e Bassanni (2016), avaliaram os impactos ambientais de unidades fotovoltaicas com duas tecnologias diferentes (tradicional/silício e orgânica), através da ACV. O estudo estende a análise para além da produção e avalia os impactos do ciclo de vida do berço ao túmulo. Dois sistemas contrastantes foram escolhidos para mostrar as diferenças na integração de produtos, na duração de utilização e nas opções de descarte, um de longo prazo (matriz solar em telhados) e outra de curto prazo (carregador solar portátil). O resultado desta comparação apontou as células orgânicas com melhor performance ambiental quando comparadas às tradicionais na perspectiva da ACV, sendo possível uma redução nos impactos em 93%.

Turconi, Boldrin e Astrup (2014) desenvolveram um framework - *EASETECH Energy* (<http://www.easetech.dk/>), para análise ambiental de usinas de energia, e realizaram o estudo de caso com dados da Dinamarca e Irlanda, onde cenários sustentáveis com baixa emissão de carbono foram modelados. A ACV proposta por (TURCONI, ROBERTO; ASTRUP, 2014) ampliou o foco da análise de CO<sub>2</sub> para outros componentes de entrada e saída do Ciclo de Vida de um sistema de geração de calor e eletricidade. A preocupação com questões específicas da ACV para sistemas de energia é o ponto forte do trabalho dos autores, mostrando dentre outras questões, a importância de considerar a unidade funcional; a seleção da categoria de impactos adequada; a definição do escopo temporal, geográfico e tecnológico do estudo; a escolha do tipo de ACV, atribucional ou consequential, descritos na seção 3.3.1; os critérios com a origem dos dados e as fronteiras do sistema; e a inclusão dos processos de transmissão e distribuição.

O framework proposto por Turconi, Boldrin e Astrup (2014), como mostra a figura 2.3 possibilita flexibilidade na modelagem, pois apresenta um conjunto de processos genéricos que permitem criar, modificar, dividir fluxos, que podem ser utilizados em vários subprocessos. O usuário pode escolher a combinação ideal para integrar tecnologias, adaptar aos escopos geográficos, temporais e tecnológicos, etc. Assim pode-se utilizar, por exemplo, o módulo 2 (Processo de Combustão) com os módulos 3 e 5, se o estudo priorizar a produção de eletricidade com baixo teor de cinzas residuais.

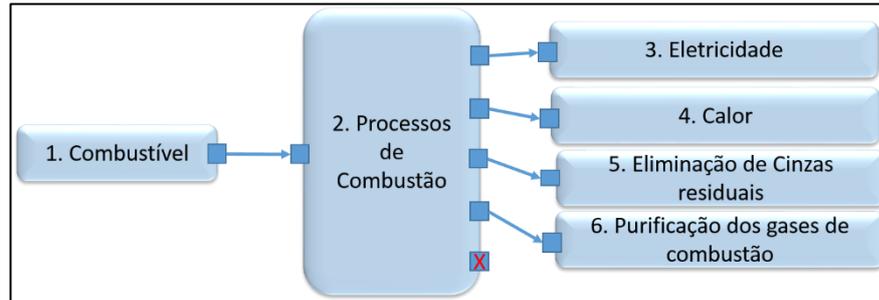


Figura.2.3-Framework EASETECH Energy  
Adaptado de Turconi, Boldrin e Astrup (2014)

Dentre os resultados e discussões apresentados pelo autor estão os desafios enfrentados pela ACV para incluir todos os indicadores que representem as especificidades de cada usina ou estudo, como: fontes diferentes (palha e madeira importada, quando biomassa); transmissão (alumínio e cobre); distribuição (infraestrutura e perda de carga); penetração de energias renováveis (eólica); consequências ambientais para geração com baixa emissão de carbono para cenários futuros; etc.

Flury e Frischknecht (2012) descreveram os impactos ambientais resultantes das fases de construção, operação e desativação de usinas hidrelétricas em condições características da Suíça e extrapolou os resultados para regiões não alpinas, inclusive o Brasil. Hidrelétricas com reservatório e a fio-d'água estão incluídas no referido estudo. Foram considerados como recursos o consumo de cimento, explosivos, aço, diesel, cobre, cascalho, transporte, uso da terra, emissões de partículas e energia consumida. Como análise final dos resultados os autores apontam que a maior parte das emissões em hidrelétricas com reservatórios nas regiões alpinas é devido ao uso de combustíveis fósseis na fase de operação e aos insumos na fase de construção. E ressaltam que as hidrelétricas em regiões não alpinas têm mais emissões produzidas pelo reservatório.

Dones *et al.*, (2007) realizaram um inventário para cobrir todas as principais cadeias de suprimento relacionadas a diferentes tecnologias de produção de energia, tais como óleo, carvão, nuclear, eólica, fotovoltaica e hidrelétrica, tendo como cenário as condições da Suíça e outros países da Europa. Para cada fonte de energia os autores modelaram toda a cadeia de suprimentos, descreveram o sistema de produção e apresentaram as contribuições das diferentes fases da ACV para as emissões. O estudo interpretou os resultados da ACV para as diferentes tecnologias mostrando que as especificidades de cada uma influenciam significativamente nos impactos ambientais.

García-Valverde, Cherni e Urbina (2010), analisaram através da ACV os impactos causados pela produção laboratorial de uma célula fotovoltaica orgânica e outra produzida

industrialmente. Apresentam um inventário detalhado de materiais a partir de matérias-primas para o módulo fotovoltaico, identificando potenciais gargalos em uma futura cadeia de fornecimento para uma grande produção industrial. E apontam a célula fotovoltaica orgânica como um nicho de mercado para um futuro próximo, que também atenderia as regiões rurais.

O estudo de Desideri *et al.* (2012) teve o objetivo de avaliar o impacto ambiental de uma planta fotovoltaica, ou seja, a sustentabilidade real desta tecnologia. O cenário é uma usina localizada em Marsciano (Perugia, Itália) e considera todas as fases da ACV, incluindo as atividades de preparação do solo, a instalação de cercas e subestações de baixa e média tensão, a montagem de estruturas de apoio, a produção de módulos, a sua instalação, a fiação para ligar os aparelhos, a conexão de rede, o transporte de todos os componentes para o local de instalação, etc. O inventário foi realizado durante a construção da usina, facilitando a coleta de dados para ACV. Os resultados são comparados com outros sistemas tradicionais de produção de energia, tais como óleo, carvão e gás natural.

Laleman, Albrecht e Dewulf (2011) analisam o impacto ambiental de sistemas fotovoltaicos residenciais em regiões com baixa incidência de radiação solar, como Bélgica, Alemanha, Reino Unido e Suécia, contrapondo à maioria dos estudos de ACV que utilizam cenários com média e alta radiação solar. Seis diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos foram avaliados. O trabalho também procura analisar se o alto custo de subsídios justifica os benefícios desta tecnologia para o meio ambiente. Em relação ao aquecimento global o estudo registrou que a eletricidade produzida por sistemas fotovoltaicos é 10 vezes menor que sistemas que utilizam carvão, porém 4 vezes maior que sistemas nucleares ou usinas eólicas.

Brizmohun, Ramjeawon e Azapagic (2015) apresentam o ciclo de vida e os impactos ambientais da geração de eletricidade nas ilhas Maurício (África), com o objetivo de informar aos gestores como estes poderiam ser reduzidos. São avaliados os impactos ambientais através da ACV de sistemas de energia de diferentes origens como combustível fóssil, carvão, bagaço da cana de açúcar e hidrelétrica. Como resultado deste estudo, os autores apontam que o menor impacto em todas as categorias analisadas é na produção de eletricidade por hidrelétricas e os maiores pela energia produzida por usinas a carvão.

Pang, Wang e Zhang (2015) avaliam os impactos ambientais de uma pequena hidrelétrica na China, para comparar os resultados com sistemas semelhantes de outros países, e identificar os fatores-chave para a mitigação das consequências negativas. A pesquisa teve como cenário a hidrelétrica de Guanyinyan, na província de Ghizhou que produz uma média anual de 6,28 GWh. A metodologia incluiu as 4 etapas da ACV e o transporte do material,

analisando os impactos para 30 anos. Os autores consideram a fase de desativação de uma hidrelétrica como ponto importante na ACV, porém difícil de encontrar relatos de hidrelétricas desativadas, por isto fazem uma aproximação de dados, simulando reciclagem e descarte do material. Como conclusão ressaltam que a etapa de construção é a principal responsável pelos impactos ambientais.

A metodologia ACV tem sido utilizada para análise dos impactos ambientais na produção de energia referenciando diversas abordagens como relatado nos trabalhos acima citados. O que se pode ter como pensamento convergente é que a ACV de uma hidrelétrica deve considerar as especificidades de cada usina, como por exemplo as características geográficas e a produtividade. E a escolha da abordagem metodológica para aplicação da ACV em uma UHE deve ser precedida de estudo criterioso para que os aspectos principais sejam incluídos na análise. O capítulo 3 apresenta uma abordagem geral sobre a metodologia da ACV conduzindo para o capítulo 4 que descreve como a ACV foi aplicada na UHE de Curuá-Una.

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISE DO CICLO DE VIDA - ABORDAGEM CONCEITUAL

A metodologia utilizada na pesquisa é ACV, como já referido na seção 2.3. A ACV está fundamentada nas normas ISO, inicialmente a ISO 14040 (ISO, 1997), que foi complementada com as normas ISO 14041 (ISO, 1998) (ISO, 2000a), 14042 (ISO, 2000a), 14043 (ISO, 2000b) e 14044 (ISO, 2006), referidas nas próximas seções. Como é a metodologia utilizada neste trabalho, uma revisão bibliográfica sobre ACV será abordada, incluindo o conceito, o histórico, as etapas, os métodos e as ferramentas disponíveis para análise.

#### 3.1 CONCEITO DE CICLO DE VIDA E DEFINIÇÃO DE ACV

O termo “ciclo de vida” é definido pela ISO 14040 (ISO, 1997) como sendo “estágios consecutivos e interligados de um sistema de produção, da aquisição da matéria prima ou geração de recursos de origem natural até a disposição final do produto”. Portanto, o ciclo de vida de um produto inclui todas as atividades de fabricação, utilização, manutenção, reuso e disposição final; incluindo a aquisição ou geração de matéria-prima necessária para a produção.

A figura 3.1 apresenta graficamente os estágios do ciclo de vida de um produto. Observa-se que o transporte deve ser incluído por ser uma atividade potencialmente geradora de impactos ambientais e que está presente, na maioria dos casos, em todo o ciclo de vida do produto.

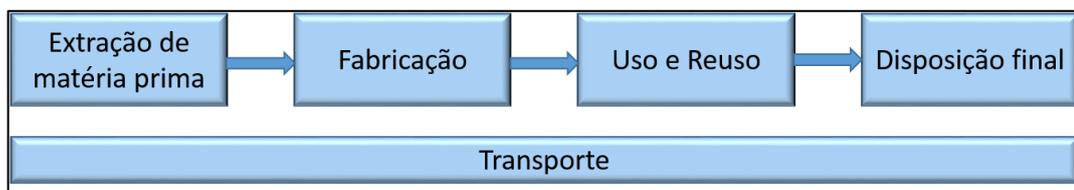


Figura 3.1-Ciclo de vida de um produto.  
Adaptado de FAVA *et al.* (1991).

As diferentes extensões para este ciclo podem considerar todo o ciclo ou parte dele. A figura 3.2 mostra a abordagem “*cradle to grave*” ou do “berço ao túmulo”, em que o ciclo se inicia na aquisição da matéria prima, passando pela manufatura, distribuição, uso e finalizando o ciclo na disposição dos resíduos.

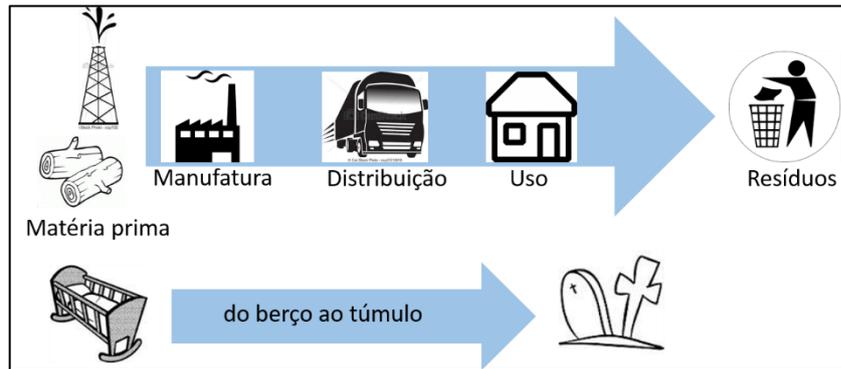


Figura 3.2 - Abordagem do berço ao túmulo.  
Adaptado de Lehtinen *et al.* (2011).

Quando há reutilização de produtos a abordagem é referenciada pelo termo “*cradle to cradle*”, do “berço ao berço”, em que os resíduos podem ser reciclados servindo de matéria prima para reiniciar outro ciclo, como está representado na figura 3.3.

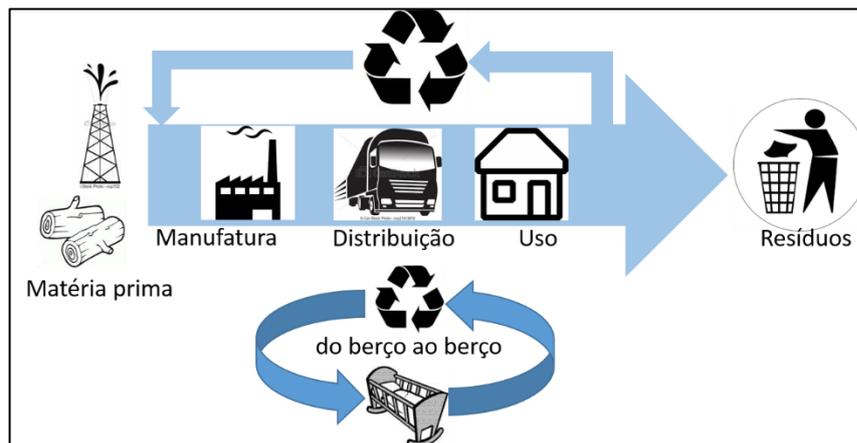


Figura 3.3 - Abordagem do berço ao berço.  
Adaptado de Lehtinen *et al.*, (2011)

Outras abordagens podem considerar a vida do produto com etapas específicas como “*cradle to gate*” do “berço ao portão”, que não inclui a análise do produto após sua fabricação, ou “*gate to grave*” do portão ao túmulo, que considera apenas o final da vida do produto, após ele ser fabricado, colocado em uso e descartado (FRISCHKNECHT; JUNGBLUTH; ALTHAUS; BAUER; *et al.*, 2007).

Ao visualizar a crescente preocupação com questões ambientais e ao considerar todas estas etapas para o ciclo de vida de um produto pode-se entender a importância de estudos para analisar os danos causados ao meio ambiente em cada uma destas etapas. É possível quantificar estes danos em medidas de sustentabilidade utilizando-se as ferramentas e métodos para ACV. De acordo com Azapagic e Stichnothe (2009), alguns exemplos destas medidas podem ser categorizados em três pilares: ambiental (energia, matéria prima, poluição do ar, poluição da água, lixo, camada de ozônio, aquecimento global, etc.), social (emprego, igualdade de

oportunidades, saúde e segurança, educação, etc.) e econômico (investimentos, custos, valor agregado, etc.).

ACV é definida pela *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) - como sendo:

Um processo para avaliar os fardos ambientais associados com um produto, processo, ou atividade identificando e quantificando energias e materiais usados, bem como rejeitos liberados para o ambiente, e avaliar e implementar oportunidades de melhorias ambientais.

Complementando, a ISO 14040 (ISO, 1997), define a ACV como sendo a compilação e avaliação de entradas e saídas e os potenciais impactos ambientais de um sistema de produção através de seu ciclo de vida.

Ainda segundo Azapagic (1999), ACV é uma ferramenta de gestão ambiental que possibilita a quantificação de danos ambientais e seus potenciais impactos sobre todo o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade.

ACV tem como objetivos principais: 1º) quantificar e avaliar a performance ambiental de um produto ou processo e auxiliar na definição da escolha entre as melhores alternativas; e 2º) prover uma base para sugerir melhorias na performance ambiental, diminuindo os impactos (FAVA *et al.*, 1991).

Possibilitando considerar todas as etapas do “berço ao túmulo” ou do “berço ao berço”, a ACV identifica os impactos mais significativos e os estágios que devem ser observados para melhorias, evitando que os danos sejam disseminados de um estágio para outro, de um problema ambiental para outro, de uma região para outra, o que poderia ocorrer se fosse avaliada somente uma atividade ou uma etapa do processo (LEHTINEN *et al.*, 2011; TURCONI, BOLDRIN e ASTRUP, 2014).

A vantagem da ACV sobre outras metodologias de análise de impacto ambiental como *Environmental Impact Assessment* (EIA) ou a *Environmental Audit* (EA), consiste na ampliação das fronteiras do sistema para incluir todos os danos e impactos produzidos no ciclo de vida do produto e não somente nas emissões de resíduos gerados na fabricação (AZAPAGIC, 1999).

Sala *et al.* (2011) afirmam, que para muitos autores, a ACV representa o estado da arte na ciência e sua aplicação no que se refere a dimensão ambiental e sustentabilidade, e seu objetivo é prover melhores informações para tomada de decisão relacionada a fabricação de produtos e serviços em ambas as esferas, negócios e política.

### 3.2 BREVE HISTÓRICO DA ACV E SUA PADRONIZAÇÃO

Os primeiros estudos sobre ACV, segundo Fava *et al.* (1991) datam da década de 60 e foram dedicados ao cálculo de energia requerida para produção de produtos químicos, em um relatório de Harold Smith na *World Energy Conference* (SMITH, 1969). Já no final da década de 60, a preocupação com o esgotamento de recursos naturais devido ao aumento da população mundial resultou em trabalhos que incluíam o consumo da matéria-prima nas análises.

Em 1969, um estudo do *Midwest Research Institute* (MIR), encomendado pela Coca-Cola Co., inventariou o uso de matéria-prima e o consumo de energia dos processos de fabricação das diferentes embalagens de bebidas da empresa. Outras companhias realizaram pesquisas semelhantes, sendo que nos Estados Unidos este processo ficou conhecido como REPA (*Resources and Environmental Profile Analysis*) e deu origem a base da metodologia da ACV; enquanto que na Europa estes estudos ficaram conhecidos como *Ecobalance* (VIGON e HARRISON, 1993). A nomenclatura “*Life Cycle Assessment*” ou em português Análise do Ciclo de Vida – ACV, foi utilizada somente em 1990, inicialmente nos EUA.

Com a crise do petróleo no início da década de 70, dezenas de estudos utilizando a ACV foram realizados com o objetivo de analisar não somente a situação atual da possível escassez de combustíveis fósseis, mas também alternativas para substituí-los na produção de energia e o custo ambiental associado. No entanto, passada a crise, o interesse pela metodologia de ACV diminuiu (FAVA *et al.*, 1991).

Na época, a diversidade de padrões e de critérios para a aplicação da metodologia produzia resultados conflitantes dos estudos. Somando-se a isto, a escassez de dados confiáveis e o alto custo operacional de aplicação da ACV conduzia as empresas a manipulação de dados e, conseqüentemente à perda de credibilidade desta ferramenta por parte dos cientistas (VIGON e HARRISON, 1993).

Na década de 80 a preocupação mundial com a deposição de resíduos sólidos no meio ambiente, principalmente das embalagens e desperdícios de alimentos, fez crescer o interesse novamente pela metodologia da ACV como uma ferramenta de análise ambiental. E em 1989 a SETAC, inicia um trabalho para padronização dos termos utilizados, e definição de um framework trazendo importantes benefícios para a o desenvolvimento da metodologia (DE HAES e HEIJUNGS, 2007)

A necessidade de conhecer melhor como conduzir a gestão ambiental e a prevenção da poluição na década de 90 colocou a metodologia da ACV como uma aliada nestes estudos, e

neste período muitos *workshops* e fóruns trataram do tema por todo o mundo. Nesta década, intensificaram-se os trabalhos para padronização e foi o período marcado pela convergência de métodos através da coordenação da SETAC e padronização das normas da *International Organization for Standardization (ISO)* (GUINÉE *et al.*, 2011).

Este esforço deu origem à família ISO 14040 como segue:

- a) ISO 14040: *Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework* (ISO, 1997);
- b) ISO 14041: *Environmental management – Life Cycle Assessment – Goal and scope definition and inventory analysis* (ISO, 1998);
- c) ISO 14042: *Environmental management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment* (ISO, 2000a);
- d) ISO 14043: *Environmental management – Life Cycle Assessment – Life Cycle interpretation* (ISO, 2000b);
- e) ISO 14044: *Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines* (ISO, 2006);

Observa-se que o padrão (ISO, 2006), substituiu seus antecessores 14041, 14042 e 14043. Alguns outros padrões ISO relacionam-se com a família ISO 14040 como a ISO 14045, a 14046 e a 14067 que tratam da gestão ambiental e eficiência ecológica nos sistemas de produção, da “pegada de água”<sup>16</sup>, e da “pegada de carbono”<sup>17</sup>, respectivamente (FINKBEINER, 2014).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem a edição destas normas sob a seguinte nomenclatura:

- a) ABNT NBR ISO 14040:2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura;

---

<sup>16</sup> Pegada de água - A pegada de água de um indivíduo, empresa ou nação é definida como o volume total de água potável que é usada para produzir os alimentos e serviços consumidos pelo indivíduo, empresa ou nação. Uma pegada de água é geralmente expressa em termos do volume de água utilizada por ano ([www.meioambiente.pr.gov.br](http://www.meioambiente.pr.gov.br)).

<sup>17</sup> Pegada de carbono - A pegada de carbono é a quantidade total de emissões de Gases de Efeito Estufa que são emitidos de maneira direta ou indireta por um determinado produto ao longo do seu ciclo de vida, desde a extração de matérias primas até seu descarte final ([www.abntonline.com.br/sustentabilidade](http://www.abntonline.com.br/sustentabilidade)).

b) ABNT NBR ISO 14044:2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações

Mesmo com a atualização e edição das normas ISO para ACV, muitas questões a serem avaliadas no processo ficam expostas à subjetividade, necessitando flexibilidade na aplicação para cada contexto estudado. Com o objetivo de direcionar e garantir melhor qualidade na aplicação desta metodologia o *Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability* (JRC-IES) criou o *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook*, contendo uma série de documentos técnicos que fornecem uma base comum para boas práticas da ACV (PENNINGTON et al., 2010). O *Handbook* é um guia para avaliar as emissões para o ar, a água e o solo, bem como o consumo de recursos naturais e sua contribuição para os diferentes impactos para a saúde humana, para o ambiente e para possível escassez de recursos (SALA, SERENELLA et al., 2011).

Segundo Guinée et al. (2011), apesar do crescimento da demanda do uso da ACV para gestão ambiental, a primeira década do século 21 é marcada ainda pela divergência de abordagens ao se aplicar o método para esta finalidade. Este desafio impulsionou movimentos e projetos para ampliar o escopo da ACV englobando as três dimensões da sustentabilidade: as pessoas, o planeta e a prosperidade; e deu origem a um framework para ACV para Sustentabilidade (LCSA - *Life Cycle Sustainability Analysis*). LCSA é o resultado do projeto *Co-ordination Action for innovation in Life Cycle Analysis for Sustainability* (CALCAS) e é considerado pelo autor como o futuro da metodologia de ACV.

### 3.3 METODOLOGIA PARA ACV

De acordo com a ISO 14040 a metodologia para ACV compreende quatro etapas: 1ª) Definição do objetivo e escopo, 2ª) Inventário do Ciclo de Vida (ICV), 3ª) Análise do Impacto (AICV) e 4ª) Interpretação, como mostra a figura 3.4. As seções seguintes descrevem cada etapa da ACV.

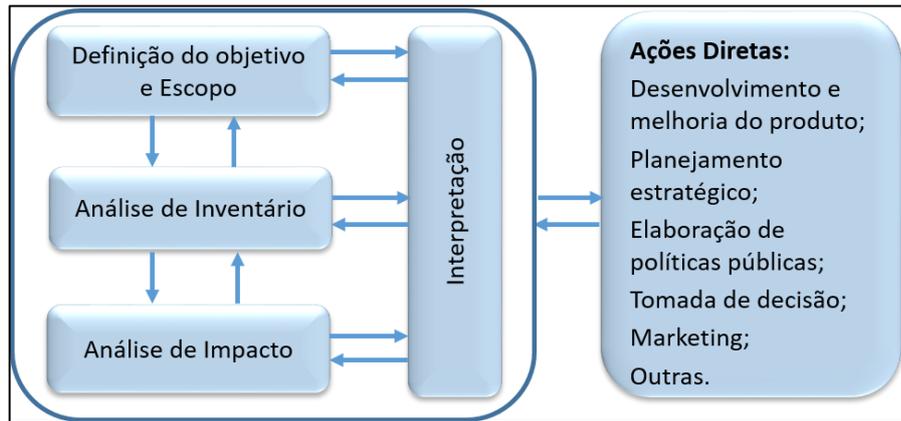


Figura 3.4 - Etapas da ACV.  
Adaptado de (ISO, 1997)

### 3.3.1 Definição do objetivo e escopo

O objetivo deve ser claramente definido de acordo com o foco da aplicação e o público a que se destina, ou seja, a quem interessam os resultados do estudo.

A ACV é uma técnica iterativa e pode, gradativamente, incluir itens para realização desta etapa inicial, conforme a necessidade e a complexidade do sistema a ser estudado. Porém uma lista de itens é recomendada pela ISO 14040 e inclui a definição: do sistema a ser estudado; das funções do sistema de produção, ou no caso de um estudo comparativo, dos sistemas; da unidade funcional; das fronteiras do sistema; da atribuição de procedimentos; dos tipos de impactos e da metodologia para análise destes impactos; da interpretação a ser utilizada; das restrições e qualidade dos dados coletados; das limitações do estudo; dos tipos de revisões críticas, quando houver e o tipo e formato do relatório necessário para o estudo. Mais detalhes e especificações destes itens estão descritas na norma ISO 14040 (pp. 5 -7).

Para Finnveden *et al.* (2009), uma importante atividade nesta fase é a escolha do método a ser utilizado para análise dos impactos. Dois tipos de ACV são reconhecidos na literatura, o atribucional e o consequencial. A ACV atribucional tem seu foco em descrever como os fluxos ambientalmente relevantes se comportam no estado atual e leva a resultados que indicam os danos ambientais de um produto ou serviço, considerando o contexto atual em que é analisado. A ACV consequencial tem como foco descrever como os fluxos ambientalmente relevantes poderiam mudar em respostas a possíveis ações, ou seja, visa a análise das consequências ambientais se houver mudanças na demanda. A opção por um dos tipos deve atender ao tipo de análise desejada.

Ciroth, Huppés e Lundie (2008) argumentam que o método consequencial deve ser utilizado quando o estudo tem por finalidade uma tomada de decisão em outros casos o método

atribucional deve ser aplicado. Em consequência da escolha do método, serão definidas as fronteiras do sistema, que descrevem os elementos chave que fazem parte do sistema e que devem estar de acordo com o objetivo da ACV.

### **3.3.2 Inventário do Ciclo de Vida - ICV**

Nesta etapa são realizados os procedimentos de coleta de dados e cálculos para quantificar as entradas e saídas relevantes para o estudo do sistema, conforme definido pelos objetivos e escopo na etapa anterior. É considerada a etapa que demanda mais tempo e recursos, podendo ser amenizada se os dados estiverem disponíveis em bancos de dados eletrônicos já adequados para este fim. Outras fontes de dados podem ser: de origem na literatura; dados fornecidos por terceiros como empresas, órgãos do governo, laboratórios, etc., e dados provenientes de coleta realizada em campo (RIBEIRO, 2004).

Esta etapa também é iterativa e conforme os dados são coletados, novos dados podem ser necessários ou limitações identificadas levando às vezes a modificações no escopo.

Os dados devem ser coletados para cada etapa do ciclo de vida. Os dados de entrada no processo incluem: o uso de recursos minerais, extração de matéria prima, transporte, energia, entre outros. Por emissão ou saída, devem ser considerados os GEEs, os resíduos tóxicos para o solo e para água. Ainda como danos que podem causar impactos, considera-se: radiação, odores, barulhos, calor, mudança no uso da terra, etc.

Referente à qualidade dos dados é necessário verificar datas, localização geográfica em que o dado foi coletado, tecnologia utilizada e ainda características como precisão, completude, consistência, representatividade e reprodutibilidade.

Os procedimentos utilizados nesta etapa podem variar e devem ser justificados no relatório. Os dados coletados nesta etapa serão as entradas para a fase de AICV. Mais detalhes para aplicação desta etapa podem ser consultados na ISO 14044 (pp. 9-15).

### **3.3.3 Análise de Impacto do Ciclo de Vida - AICV**

Esta é uma etapa de avaliação técnica quantitativa e/ou qualitativa dos efeitos das cargas ambientais identificadas na fase anterior. A terceira fase da ACV tem por objetivo avaliar, quantificar e converter as cargas ambientais causadas pelos fluxos de entrada e saída do sistema, em impactos para a saúde, o meio ambiente e o uso de recursos naturais.

De acordo com a ISO 14044, nesta etapa é necessária a seleção de categorias de impacto, a definição dos indicadores de categoria, e dos modelos de caracterização, além da classificação

e caracterização dos dados, como atividades obrigatórias. Como atividades opcionais podem ser acrescentadas a normalização, a agregação, a ponderação e a validação da qualidade dos dados. Os elementos obrigatórios convertem os resultados da etapa anterior no perfil ambiental para as diferentes categorias de impacto e os elementos opcionais servem para normalizar, agrupar ou pesar os resultados do indicador e as técnicas de análise de qualidade dos dados (FERREIRA, 2004).

A classificação dos dados consiste em atribuir os dados inventariados a uma categoria de impacto. Uma categoria de impacto é uma classe representando problemas ambientais, como aquecimento global, acidificação, toxicidade humana, etc. Na caracterização o impacto de cada emissão ou recurso utilizado é calculado usando fatores de impacto. Por exemplo, o impacto da emissão de metano ( $\text{CH}_4$ ) para aquecimento global, é estimado usando como fator o dióxido de carbono equivalente ( $\text{kg CO}_2\text{eq}$ ). Esta é uma medida aceita internacionalmente que expressa o potencial de qualquer GEE para aquecimento global em relação ao  $\text{CO}_2$ . O impacto da emissão de metano para o aquecimento global tem fator de 25  $\text{kg CO}_2\text{eq}$  por cada  $\text{kg}$  de  $\text{CH}_4$ , ou seja 1  $\text{kg}$  de  $\text{CH}_4$  tem 25 vezes maior impacto para o aquecimento global do que o  $\text{CO}_2$  (LEHTINEN *et al.*, 2011). A figura 3.5 apresenta um exemplo dos passos para classificar e caracterizar os resultados do ICV para a categoria de impacto “acidificação”.

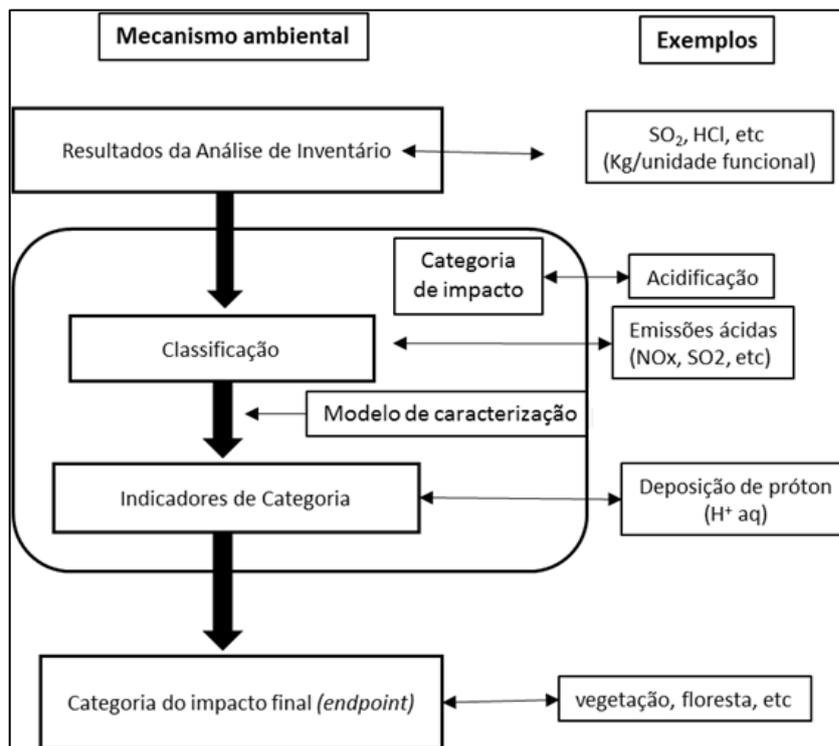


Figura 3.5 - Mecanismo Ambiental.  
Adaptado de (ISO, 1997)

Neste exemplo, o mecanismo ambiental representa a “acidificação” como categoria de impacto. O fluxo do processo inicia com os elementos identificados no ICV (SO<sub>2</sub>, HCl, etc.). Como eles produzem emissões ácidas como NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>, são classificados na categoria de acidificação. O indicador da categoria é a deposição de prótons e o impacto final para o meio ambiente é a degradação da floresta e da vegetação.

Os métodos ainda possibilitam avaliações que abordam o ponto médio (*midpoint*) que é o fator causador de um dano e o ponto final (*endpoint*) que é o dano causado por este fator. O ponto médio, também conhecido como abordagem orientada a problema, traduz os impactos em resultados como mudança de clima, acidificação, toxicidade humana, etc. O ponto final, também conhecido como abordagem orientada a danos, tem como resultados impactos à saúde humana, à biodiversidade e aos recursos naturais. A figura 3.6, exemplifica a relação entre a abordagem “*midpoint*” e “*endpoint*”.

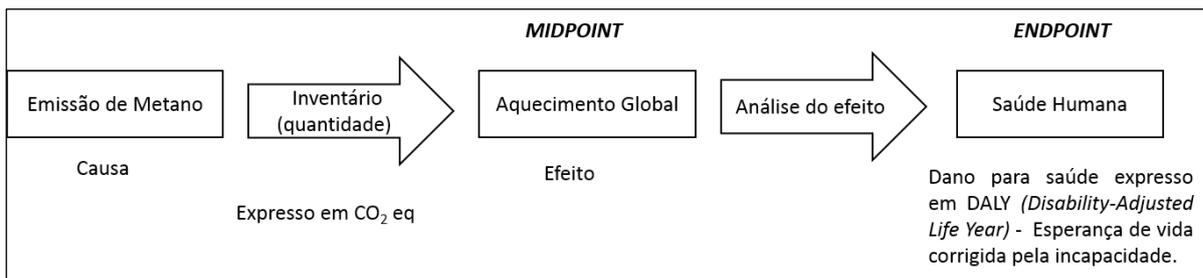


Figura 3.6 - Relação entre “*midpoint*” e “*endpoint*”.

De acordo com Acero, Rodriguez e Ciroth (2014), as categorias de impacto mais comumente utilizadas estão descritas no quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Categorias de impacto utilizadas para a etapa de Análise de Impacto em uma ACV.  
Adaptado de Acero, Rodríguez e Ciroth, (2014)

<b>Categoria</b>	<b>Definição</b>	<b>Indicador de impacto</b>	<b>Categoria de danos ambientais</b>	<b>Unidade referencial</b>
Acidificação	Redução do pH devido aos efeitos acidificantes das emissões antropogênicas, resultado da chuva ácida provocada por gases como SO <sub>x</sub> e NO <sub>x</sub> .	Aumento da acidez na água e no solo.	Danos na qualidade do ecossistema e diminuição da biodiversidade	Kg SO <sub>2</sub> eq
Potencial de Aquecimento Global	Alteração da temperatura global causada pelos Gases de Efeito Estufa (ex. Metano)	Perturbações na temperatura global e nos fenômenos climáticos.	Diminuição da biodiversidade, distúrbio da temperatura, potencialização dos fenômenos como ciclones, secas, etc.	Kg CO <sub>2</sub> eq

<b>Categoria</b>	<b>Definição</b>	<b>Indicador de impacto</b>	<b>Categoria de danos ambientais</b>	<b>Unidade referencial</b>
Esgotamento dos recursos abióticos	Diminuição da disponibilidade dos recursos abióticos como resultado do uso não sustentável.	Diminuição dos recursos	Danos para os recursos naturais e possível colapso do ecossistema.	Dependendo do modelo: Kg de antimônio eq, Kg de minerais, MJ de combustíveis fósseis ou m <sup>3</sup> de água consumida.
Ecotoxicidade	É a medida dos efeitos tóxicos de produtos químicos no ecossistema.	Perda da biodiversidade e extinção das espécies.	Danos para a qualidade do ecossistema e extinção das espécies.	Dependendo do modelo: kg 1,4-DCB (Diclorobenzeno) equivalente, PDF (Fração potencial de desaparecimento de espécies) ou PAF (Fração Potencial de espécies afetadas)
Eutrofização	Acúmulo de nutrientes em sistemas aquáticos.	Formação de biomassa (ex. algas) e aumento da concentração de nitrogênio e fosforo.	Danos na qualidade dos ecossistemas.	Dependendo do modelo: Kg PO <sub>4</sub> eq, Kg N eq
Toxicidade Humana	Efeitos tóxicos de produtos químicos em humanos.	Câncer e doenças respiratórias, outros efeitos não-cancerígenos e efeitos de radiação por íons.	Saúde humana.	Dependendo do modelo: Kg 1,4-DCB eq DALY (Anos de vida considerados por incapacidade)
Radiação por íons	Tipo de radiação, composto de partículas com energia suficiente para libertar um elétron de um átomo ou molécula.	Efeitos da radiação (declínio da saúde, câncer, doenças, etc).	Saúde humana e qualidade do ecossistema.	Kg de U <sub>235</sub> eq ou DALY
Uso da terra	Impactos do uso da terra devido a agricultura, colonização e extração de recursos.	Perda de espécies, empobrecimento do solo, aumento da quantidade de teor de matéria seca orgânica, etc.	Esgotamento dos recursos naturais, orgânicos e não orgânicos.	PDF/m <sup>2</sup> (Fração potencial de desaparecimento de espécies) ou m <sup>2</sup> a (metro quadrado vezes ano).
Diminuição da camada de ozônio na atmosfera	Diminuição da camada de ozônio da estratosfera devido às emissões antropogênicas de substâncias que destroem o ozônio.	Aumento da radiação UV-B ultravioleta e por consequência do número de casos de doenças de pele.	Saúde humana e qualidade do ecossistema.	Kg CFC*-115eq (* ) Clorofluorcarbono
Partículas de matéria	Partículas suspensas extremamente pequenas, que se originam de processos antrópicos, tais como combustão, extração de recursos, etc.	Aumento nas partículas de diferentes tamanhos em suspensão no ar (PM10, PM2.5, PM0.1)	Saúde humana.	Kg de material particulado.
Oxidação fotoquímica	Tipo de poluição criada a partir do efeito da luz solar, calor e COVNM (Compostos orgânicos	Aumento do <i>smog</i> de verão (acúmulo de poluição que	Saúde humana e qualidade do ecossistema.	Dependendo do modelo: Kg etileno eq, Kg COVNM, Kg ozônio.

<b>Categoria</b>	<b>Definição</b>	<b>Indicador de impacto</b>	<b>Categoria de danos ambientais</b>	<b>Unidade referencial</b>
	voláteis não-metano) e NOx	forma uma neblina).		

Nesta etapa ainda podem ser necessários os processos de normalização, agregação, ponderação e análise da qualidade dos dados, que são definidos conforme a (ISO, 2006) como segue:

- a) Normalização: consiste em calcular a magnitude relativa de cada resultado do indicador comparando com uma informação de referência.
- b) Agregação: consiste em separar e ordenar as categorias de impacto.
- c) Ponderação: consiste em atribuir pesos ou valores relativos às diferentes categorias de impacto conforme a sua relevância.
- d) Análise da qualidade dos dados: é uma técnica adicional utilizada para uma melhor compreensão da importância, do grau de incerteza e da sensibilidade dos dados.

### **3.3.4 Interpretação**

A última fase da ACV objetiva identificar as questões ambientais significativas presentes nos resultados das fases anteriores; avaliar a metodologia, checar a consistência, completude e sensibilidade dos dados e propor recomendações para melhorias na performance do sistema (ISO, 2006). A interpretação como fase última da ACV é um processo de comunicação projetado para dar credibilidade para os resultados das fases anteriores e produzir relatórios compreensíveis e úteis para tomada de decisão (JENSEN, 1998).

Nestas quatro etapas a ACV estuda aspectos ambientais de um sistema de produção da matéria prima à disposição final, podendo variar sua extensão de abordagem dependendo do objetivo do estudo e escopo, que devem ser bem definidos. A origem dos dados deve ser cuidadosamente analisada e documentada e as restrições de confidencialidade respeitadas. A metodologia deve ser flexível o suficiente para incluir descobertas científicas e melhorias no estado da arte da tecnologia (ISO, 1997).

Ainda de acordo com a ISO 14040, não existe uma base científica para reduzir o resultado da ACV a uma única medida ou um simples valor, devido à complexidade dos sistemas. E não há um único método para implementar a ACV. As organizações devem adaptar a metodologia para seu contexto.

### 3.4 MÉTODOS E FERRAMENTAS PARA AICV

Processos são auxiliados por métodos e ferramentas. E para auxiliar a etapa de AICV existem diversos métodos que devem ser utilizados conforme o contexto e o objetivo do estudo e ferramentas para automatizar o processo. Desta forma alguns métodos contem bases de dados mais adequadas para o setor de energia, outros para o setor da agricultura ou para o setor da saúde e assim para muitos outros contextos. Nesta seção serão apresentadas as características de alguns métodos como também algumas ferramentas disponíveis para auxiliar o processo de AICV.

#### 3.4.1 Métodos para AICV

Método no que se refere à Análise de Impacto em uma ACV é dito como um conjunto de impactos que formam uma categoria e farão parte de uma base de dados. Não há recomendação de um número mínimo de itens a serem incluídos na análise. Em geral, a escolha pela categoria de impactos e o número de itens, a serem incluídos em uma ACV é baseada no escopo do estudo, na intenção da aplicação dos resultados e na disponibilidade dos dados, conforme sugere o *ILCD Handbook* (JRC, 2010). Cada base de dados possui características que serão mais úteis a cada contexto específico. Portanto a escolha do método depende dos indicadores existentes na categoria e da forma como foram normalizados e ponderados. Alguns disponíveis para utilização são:

- a) CML 2001 – Criado pela Universidade de Leiden (Holanda) em 2001, contém aproximadamente 1700 diferentes fluxos que podem ser adquiridos pelo site (<http://www.universiteitleiden.nl/en/science/environmentalsciences/tools-and-data>). O método CML 2001 avalia os impactos seguindo uma abordagem orientada a problemas (*midpoint*), diferenciando-se de alguns outros que seguem a abordagem orientada a danos (*endpoint*). As categorias de impacto que podem ser implementadas pelo CML 2001 são: potencial de acidificação, potencial de aquecimento global, potencial de eutrofização, ecotoxicidade da água doce, toxicidade humana, uso da terra, ecotoxicidade da água do mar, oxidação fotoquímica, esgotamento dos recursos abióticos, esgotamento do ozônio estratosférico, ecotoxicidade terrestre, mau odor no ar, ecotoxicidade de sedimentos em água doce, ecotoxicidade de sedimentos marítimos, radiação por íons (JRC, 2010).
- b) ReCiPe – O método ReCiPe 2008 foi criado com o objetivo de harmonizar os métodos CML e Eco-Indicator 99, amplamente aceitos, porém com abordagens diferentes. O

- primeiro utiliza a abordagem *midpoint*, enquanto que o segundo a abordagem *endpoint*. Portanto o Recipe 2008 disponibiliza recursos para análise *midpoint* e *endpoint*, possibilitando visões diferentes e complementares para interpretação. Na abordagem *midpoint*, este método inclui 18 indicadores: mudança de clima, depleção do ozônio, acidificação terrestre, eutrofização da água doce, eutrofização marinha, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de matéria particulada, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, radiação ionizante, ocupação de terras agrícolas, ocupação de terra urbanas, transformação de terras naturais, depleção da água, depleção dos recursos naturais, depleção de recursos fósseis. Estes indicadores são classificados em 3 categorias na abordagem *endpoint*: qualidade da saúde humana, qualidade do ecossistema e disponibilidade de recursos naturais. Os resultados da abordagem *endpoint* no ReCiPe é dada em pontos, facilitando posterior comparações com ACVs de outras fontes de energia, bem como processo de otimização em relação a impactos/custos (GOEDKOOPE *et al.*, 2009a).
- c) IPCC 2013 - *Intergovernmental Panel on Climate Change* - O IPCC utiliza as medidas de emissão de gases de efeito estufa para caracterizar o Potencial de Aquecimento Global como impacto ambiental. Três horizontes de tempo são utilizados para mostrar os efeitos dos diferentes gases na atmosfera: 20 anos, 100 anos e 500 anos. O Potencial de Aquecimento Global é um índice para estimar a contribuição da emissão de um kg de um gás com efeito estufa, em comparação com a emissão de um kg de dióxido de carbono (FRISCHKNECHT, JUNGBLUTH, ALTHAUS e BAUER; *et al.*, 2007).
- d) CED - *Cumulative Energy Demand* – A análise de energia acumulada investiga o uso de energia através do Ciclo de Vida de bens ou serviços, incluindo o consumo direto e indireto, como por exemplo a energia utilizada para aquisição de matéria prima. Este método é uma boa forma de apontar quais os pontos em que é possível a economia de energia nas etapas do ciclo de vida de um produto. Porém é também muito utilizado para análise dos impactos ambientais (FRISCHKNECHT, JUNGBLUTH, ALTHAUS e BAUER; *et al.*, 2007).
- e) Eco-indicator 99 – Este método analisa três diferentes tipos de danos: saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos. Substituiu o método Eco-Indicator 95, que foi o primeiro a abordar a análise “*endpoint*”. Uma importante característica é que possibilita expressar o impacto ambiental em um único valor, convertendo todas as categorias de

impacto em uma única unidade (points), facilitando a comparação entre produtos. (<http://www.earthshift.com/software/simapro/eco99>)

- f) *Ecological Scarcity Method*. Método da Escassez Ecológica, calcula os impactos ambientais da emissão de poluentes e consumo de recursos naturais aplicando “eco-fatores”. Os eco-fatores diferenciam-se conforme a substância que está sendo analisada e obedecem a normas legais e metas políticas. Desta forma, quanto mais o nível de consumo ou poluição excede a meta ambiental, mais alto será seu eco-fator que é expresso em “eco-points”. (FRISCHKNECHT, JUNGBLUTH, ALTHAUS e BAUER; *et al.*, 2007)
- g) ILCD - *International Reference Life Cycle Data System* - Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida. O ILCD foi construído baseado nas normas ISO para ACV – (ISO, 1997) e fornece orientação técnica detalhada sobre todos os passos necessários em uma ACV. O objetivo deste método foi reunir as melhores práticas de métodos já existentes e a sua estrutura inclui: (i) um guia *International Reference Life Cycle Data System Handbook – ILCD Handbook*, que consiste de uma série de documentos técnicos para prover boas práticas de ACV, tem o suporte de ferramentas, *templates*, etc; (ii) e o *ILCD Data Network*, que consiste de uma base de dados aberta para todos os fornecedores tais como empresas, pesquisadores, etc. Fornece dados consistentes e de qualidade garantida sobre o consumo de recursos e as emissões com base nos requisitos do ILCD Handbook (SALA, S *et al.*, 2012).
- h) TRACI 2.1 - *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts* - Foi desenvolvido para métricas de sustentabilidade, avaliação de impacto do ciclo de vida, ecologia industrial, e concepção de processos para desenvolver produtos, processos, instalação de empresas e comunidades cada vez mais sustentáveis. Possibilita a quantificação de estressores que têm efeitos potenciais, incluindo a destruição do ozônio, aquecimento global, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade, esgotamento de combustíveis fósseis dentre outros (BARE *et al.*, 2012).

### 3.4.2 Bases de dados para AICV

A análise dos dados inventariados para obter os fatores de impacto é facilitada por ferramentas desenvolvidas para este fim (apresentadas no próximo tópico). Porém, para realizar a análise é preciso uma base de dados que contenha os fluxos participantes do processo analisado. Por exemplo, se forem utilizados os elementos aço, cobre e alumínio em um certo

processo, é necessário ter o fluxo da produção destes elementos para que os impactos causados pela sua produção sejam contabilizados no processo como um todo.

Estes fluxos estão presentes nas bases de dados já construídas para este fim. Existem bases de dados livres – gratuitas e comercializadas, direcionadas para os diversos contextos, como para a agricultura, para medicamentos, para fertilizantes, para os diversos tipos de fontes de energia, etc. Algumas destas bases de dados são apresentadas a seguir:

- a) Ecoinvent LCI database. Criado em 1997, inicialmente sob a responsabilidade do Instituto de Tecnologia de Zurique (Suíça), está na versão 3.2, atualizada em dezembro de 2015. É uma das mais utilizadas para ACV e disponibiliza mais de 11.500 bases de dados para inventário, que abrangem áreas como agricultura, suprimentos de energia, transporte, biocombustíveis, materiais de construção, metais preciosos, tratamento de resíduos, etc. É comercializada, porém tem licença livre de custos para fins educacionais para países que não fazem parte da Organização para Cooperação do Desenvolvimento Econômico – OECD, como o Brasil. (<http://www.ecoinvent.org/>)
- b) Gabi LCI database. É uma base de dados mantida pela empresa alemã Thikstep. Disponibiliza dados para mais de 10.000 perfis ambientais, abrangendo vários contextos como agricultura, indústria, construção, educação, eletrônicos, plástico, alimentação, saúde, têxteis, serviços, etc. Possui também como o Ecoinvent, algumas bases de dados disponíveis, sem custos para estudantes universitários. (<http://www.gabi-software.com/international/databases/gabi-databases/>)
- c) European Life Cycle Development – ELCD. Construída pela *Joint Research Center – JRC*, baseada em fatores característicos da Europa. Sua última versão data de outubro de 2015 e possui mais de 300 bases de dados relacionadas a energia, transporte, produção e descarte de materiais. (<http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/index.xhtml>)
- d) DataSmart database. Base de dados fornecida pela empresa norte-americana *Earthshift*. Contém conjuntos de dados do Ecoinvent modificados e mais 700 processos que abrangem indústrias têxteis, embalagens, biomateriais, produtos lácteos e os sistemas de eletricidade dos EUA. O resultado final é um banco de dados que melhor representa as operações dos EUA. (<https://nexus.openlca.org/databases>)
- e) PSILCA database - PSILCA é um novo banco de dados para ACV social desenvolvida pela GreenDelta, empresa de desenvolvimento e consultoria de assuntos ligados à sustentabilidade, localizada em Berlim, Alemanha. Contém informações de inventário

genérico abrangente para quase 15.000 setores da indústria e de *commodities*, de cálculo e de avaliação de impactos sociais de produtos ao longo de seus ciclos de vida, e para a detecção de *hotspots*<sup>18</sup> sociais. É disponibilizado através de licença paga. (<https://nexus.openlca.org/search/Database=PSILCA>)

- f) U.S Life Cycle Inventory - USLCI. Base de dados americana desenvolvida pela *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Possui aproximadamente 300 bases de dados relacionadas a diferentes processos de manufatura de produtos, transporte e serviços. É livre para uso, sem custos. (<http://www.nrel.gov/>)
- g) New Energy Externalities Developments for Sustainability – NEEDS. A base de dados criada pela NEEDS, disponibiliza um inventário do ciclo de vida do futuro abastecimento de eletricidade na Europa. Contém dados de AICV industriais em serviços de transporte, eletricidade e fornecimento de material. Seus dados são disponibilizados sem custos. (<http://www.needs-project.org/metho/lca.htm>)

Algumas bases de dados são direcionadas para setores específicos como a OEKOPro (<http://www.oekopro.de/>), uma base interativa que disponibiliza livremente dados para a indústria química e sua toxicidade, contém planilhas para mais de 7.000 produtos. A Ökbau.dat (<http://www.nachhaltigesbauen.de/oekobaudat/>), base de dados alemã voltada para construção civil, é outro exemplo, dentre outras.

### 3.4.3 Ferramentas para AICV

Muitos são os softwares disponíveis para Análise de Impacto de uma ACV. Alguns com maior flexibilidade para interagir com diferentes bases de dados, outros mais comprometidos com a empresa responsável pela comercialização. Dentre os mais populares no mercado estão:

- a) SimaPro. Já na versão 8, software amplamente utilizado por grandes empresas, portanto já consolidado no mercado. Pode calcular a pegada de carbono de vários tipos de produtos e sistemas. Usando seus parâmetros personalizáveis pode determinar o potencial impacto ambiental que um sistema ou serviço produz. Possui custo para licença. (<http://www.pre-sustainability.com/simapro>)
- b) Gabi software. Desenvolvido pela Universidade de Stuttgart, disponibiliza diferentes versões para uso comercial e acadêmico. Facilita a modelagem do processo através de

---

<sup>18</sup> *Hotspots* sociais – São locais em que há situações consideradas ameaças para o bem-estar social ou que possam contribuir para o seu desenvolvimento.

- sua interface gráfica. Possui sua própria base de dados, porém permite o uso de outras bases de forma intuitiva. Considerada como uma ferramenta com curva de aprendizado bastante positiva. (<http://www.gabi-software.com/>)
- c) Open Source Life Cycle Assessment - openLCA. Software livre, com portabilidade para as versões mais atuais dos Sistemas Operacionais, pode ser configurado para interagir com diferentes bases de dados. Possui recursos para a produção de relatórios permitindo adaptá-los para as necessidades do usuário. (<http://www.openlca.org>)
- d) Umberto – Este software dá suporte à ACV e também à análise de pegadas de carbono para Declaração de Produto Ambiental, Environmental Product Declaration – EPD. As versões disponíveis estão entre as comercialmente mais acessíveis. (<http://www.umberto.de/en/versions/umberto-nxt-lca/>)
- e) Quantis Suite 2.0. A suíte Quantis possibilita o acesso de não-especialistas, pois possui modelos e assistentes que fazem todo o processo de avaliação do ciclo de vida e outras análises muito simples. Os resultados são robustos, o que permite simplicidade na descrição de produtos e relatórios. Pode ser configurado para auto-atualização. Possui uma versão livre. (<http://www.quantis-intl.com/en/offer/life-cycle-assessment/>)
- f) LCA Calculator. Este é um software com base na WEB, não necessita ser instalado e permite o cálculo da pegada de carbono para comparação entre produtos. Possui vários tipos de licença para uso profissional e acadêmico. (<http://www.lcacalculator.com/>)

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA PARA ACV DA UHE DE CURUÁ-UNA

O trabalho aqui apresentado aplica a metodologia da ACV com base nas normas ISO 14040 (ISO, 1997). Porém utiliza adaptações inspiradas em outros trabalhos para adequar a metodologia ao escopo e objetivo da pesquisa. Os trabalhos citados no tópico 2.3 apontam questões específicas da ACV para diferentes sistemas de energia, mostrando questões importantes que foram consideradas ao elaborar o modelo de processo adotado para ACV da UHE de Curuá-Una. A figura 4.1 apresenta o processo das quatro etapas previstas para realização da ACV da UHE de Curuá-Una, com as atividades planejadas. A descrição da metodologia segue neste capítulo.

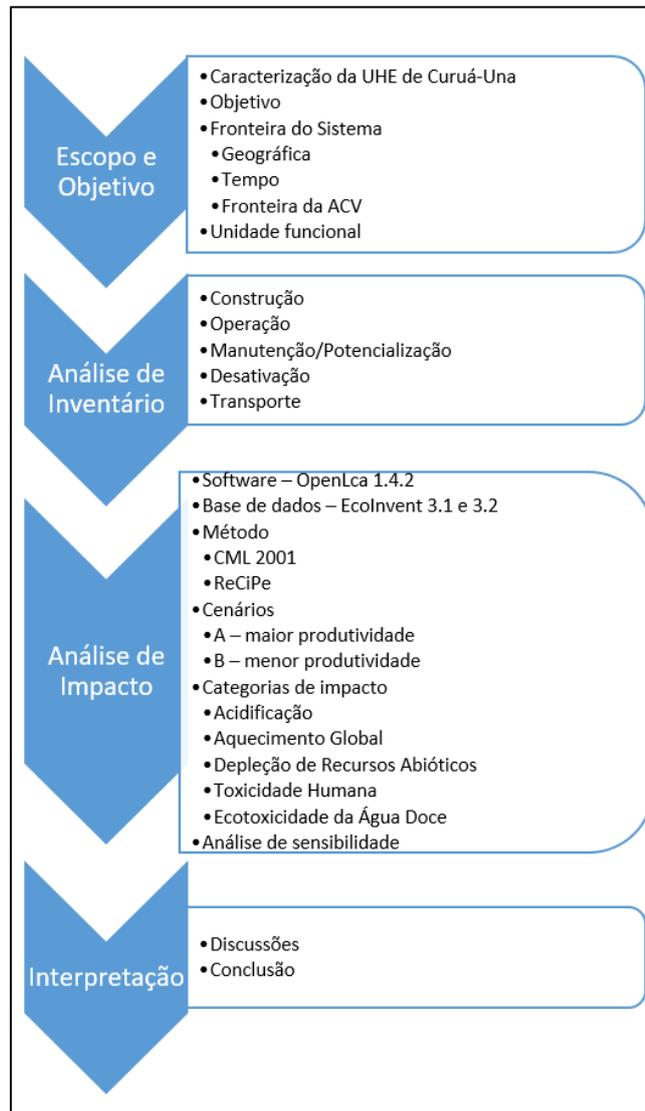


Figura 4.1 Modelo de processo da ACV da UHE de Curuá-Una e as atividades de cada etapa.

#### 4.1 PRIMEIRA ETAPA: DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

Na primeira etapa do processo é definido o objetivo e escopo. Foram incluídas informações relacionadas às características estruturais e funcionais da UHE de Curuá-Una, complementando com a identificação das fronteiras importantes para o estudo, como fronteira geográfica, fronteira de tempo de vida e fronteira relacionada a ACV. Nesta etapa também é definida a unidade funcional.

#### 4.2 SEGUNDA ETAPA: ANÁLISE DE INVENTÁRIO

Para o inventário realizou-se a coleta de dados através de visitas à hidrelétrica de Curuá-Una, obtendo-se informações diretamente das pessoas responsáveis pelo funcionamento da usina atualmente, bem como através de pessoas que participaram da obra e fazem parte do quadro de funcionário até hoje, como o Sr. Mário Pedreiro – coordenador de manutenção e meio ambiente da divisão de geração hidráulica da UHE de Curuá-Una. Além das entrevistas, foram disponibilizados relatórios necessários a esta etapa da pesquisa. Algumas informações foram obtidas através de pesquisa bibliográfica, através de contato com empresas fornecedoras de matéria prima, através de sites de empresas que fabricam os equipamentos, dentre outros recursos. Muitas vezes, porém, não foram encontrados os dados, já que a construção da usina aconteceu em 1977, e nestes casos optou-se por: a) fazer uma aproximação baseada em dados de outras hidrelétricas, com atenção às devidas proporções; b) fazer uso dos fluxos encontrados na base de dados do Ecoinvent 3.1 e 3.2. Estas são as opções utilizadas por outros autores (TURCONI e ASTRUP, 2014; RIBEIRO, 2004; PALANOV, 2014; FENG *et al.*, 2014; MOREAU *et al.*, 2011) e justificadas pelo *ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and action steps* (PENNINGTON *et al.*, 2010).

Para criar os processos, utilizou-se o software openLCA 1.4.2 por ser uma ferramenta com licença livre para uso sem restrições e com tutoriais e exemplos disponíveis para acesso, já apresentada em 3.4.3. A base de dados para inserir os fluxos de cada insumo foi o EcoInvent 3.1 e 3.2. Cada insumo inventariado foi inserido no processo com suas respectivas quantidades obtidas no inventário e unidades.

Os dados coletados foram inseridos na planilha (tabela 4.4) apresentada na fase de inventário, em suas quantidades totais, como insumos para as fases de Construção, Operação, Manutenção e Desativação. Porém foi necessário fazer o cálculo da quantidade destes insumos equivalente a produção de 1 MWh, que é a unidade funcional utilizada para a presente ACV. Para este cálculo, fez-se uma projeção para o funcionamento da usina em um horizonte de 100

anos, tempo médio de vida de uma hidrelétrica, conforme Brännström-Norberg *et al.* (1996), e recomendado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*, Painel Intergovernamental da Mudança do Clima (KUMAR *et al.*, 2011). Sendo que durante os primeiros 8 anos, a UHE de Curuá-Una operou com duas turbinas, com capacidade de 20 MW; durante os 32 anos seguintes operou com 3 turbinas e capacidade de 30,3 MW e durante os 60 anos restantes até o final do ciclo de 100 anos, está previsto que a usina irá operar com 4 turbinas e capacidade de 42,8 MW. A tabela 4.1 exemplifica o cálculo para o total de produção em MWh em 100 anos, onde a quantidade de horas trabalhadas no período é multiplicada pela capacidade, tendo como resultado a produção em MWh. A soma do período de 100 anos (29.976.720 MWh) representa o fator que deverá dividir as quantidades totais, para se obter os insumos necessários para 1 MWh.

Tabela 4.1- Cálculo para obter a produção em 100 anos em MWh com 92,89%<sup>19</sup> de capacidade.

	<b>Horas</b>	<b>Capacidade (92,89%)</b>	<b>MWh</b>
2 turbinas (8 anos)	70.080	18 MW	1.261.440
3 turbinas (32 anos)	280.320	28 MW	7.848.960
4 turbinas (60 anos)	525.600	39,7 MW	20.866.320
<b>TOTAL (100 anos)</b>			<b>29.976.720 MWh</b>

A tabela 4.2, mostra como calcular os insumos necessários para produzir 1 MWh (unidade funcional). Para o insumo aço para equipamentos, por exemplo, obtivemos o valor por unidade funcional dividindo o valor total de 4,33E+05 kg pela produção de 29.976.720 MWh, o que resulta em 1,44E-02 kg/MWh. O mesmo cálculo é feito para o insumo energia, cujo resultado também é mostrado na tabela 3.2. Todos os valores dos insumos do ICV da UHE Curuá-Una estão detalhados no subcapítulo 4.2.

Tabela 4.2 - Exemplo de cálculo para insumos relativos a 1 MWh.

<b>Insumo/Recurso</b>	<b>Total</b>	<b>Unidade (1 MWh) para capacidade de 92,89%</b>
Aço	4,33E+05 kg	1,44E -02 kg/MWh
Energia	1,41E+08 kWh	4,70E+00 kWh/MWh

Para a ACV da UHE de Curuá-Una são avaliados dois cenários, cenário A e cenário B, com dados da planilha IGS<sup>20</sup> 2015 (ELETRONORTE, 2015).

<sup>19</sup> Rendimento máximo de produção da UHE de Curuá-Una conforme ficha técnica (OGH, 2015).

<sup>20</sup> Planilha IGS - é o **Inventário Geral Simplificado** de situações que causam efeito estufa. A Eletronorte faz este controle de forma a monitorar todas as situações de produção e destinação de resíduos para compor a gestão dos elementos que possam causar efeito estufa como exigência da ANEEL (órgão controlador).

#### 4.2.1 Cenário A

Para compor o cenário A, considerou-se a capacidade máxima de produção da UHE de Curuá-Una (92,89%). Este percentual foi obtido através de informação contida na ficha técnica (OGH, 2015), que se refere à máxima produtividade que a usina pode alcançar, ou seja em uma condição apropriada com cota do reservatório de 68m. Desta forma, com esta performance, a capacidade com 2 turbinas, equivale a 18 MW; com 3 turbinas, a 28 MW e em uma futura configuração da usina utilizando as 4 turbinas, a capacidade equivalente será de 39,7 MW. O cálculo para 100 anos considera estas capacidades, ficando os totais de produção em 29.976.720 MWh como já detalhado na tabela 4.1.

#### 4.2.2 Cenário B

Para compor o cenário B, considerou-se um cenário alternativo de produção da UHE de Curuá-Una, com a máxima produção chegando em 70%, quando a cota do reservatório está com 64m. Desta forma, contando com 2 turbinas, chega a capacidade 14 MW; com 3 turbinas, a capacidade de 21 MW e com 4 turbinas, a capacidade de 29 MW, ficando os totais de produção para 100 anos em 22.110.240 MWh. Este é o fator considerado para dividir o total de cada insumo, e obter-se o consumo por MWh, para este cenário, como mostra a tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Cálculo para obter a produção em 100 anos (MWh), com aproximadamente 70% de capacidade de produção

	Horas	Capacidade (70%)	MWh
<b>2 turbinas (8 anos)</b>	70.080	14 MW	981.120
<b>3 turbinas (32 anos)</b>	280.320	21 MW	5.886.720
<b>4 turbinas (60 anos)</b>	525.600	29 MW	15.242.400
<b>TOTAL (100 anos)</b>			22.110.240 MWh

### 4.3 TERCEIRA ETAPA: ANÁLISE DE IMPACTO

Com os processos criados, a próxima etapa é realizar a Análise de Impacto para as categorias selecionadas. Nesta etapa utiliza-se métodos já existentes nas bases de dados. Conforme o objetivo do estudo, seleciona-se o método mais adequado. Para este estudo utilizou-se os métodos e CML 2001 (para análise *midpoint*) e ReCiPe (para análise *endpoint*). A escolha por estes recursos se deve ao fato de serem as opções adotadas em muitos trabalhos que realizam ACV no contexto de energia tais como: Pang *et al.* (2015); Brizmohun, Ramjeawon e Azapagic (2015); Santoyo-Castelazo, Gujba e Azapagic (2011); Suwanit e Gheewala (2011); Tsang, Sonnemann, Bassani (2016). Desta forma a comparação entre diferentes ACVs é facilitada.

### 4.3.1 Análise *midpoint* – método CML 2001

O CML 2001 é um método considerado clássico pois faz a análise *midpoint*, ou seja, análise orientada a problemas. Implementado pelo Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden (CML), Holanda. Inclui a etapa de normalização para a Europa Ocidental, para a Holanda e para o resto do mundo. Abrange 15 categorias de impacto, com algumas ainda divididas em subcategorias. Na ACV da UHE de Curuá-Una foram analisadas 5 categorias utilizando o CML 2001, descritas a seguir:

- a) Acidificação – Gases ácidos como o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) reagem com a água da atmosfera, formando a “chuva ácida”, processo conhecido como precipitação ácida. O efeito da chuva ácida pode se estender por regiões distantes do local onde são emitidos os gases, provocando danos ao ecossistema como a corrosão de estruturas metálicas, mortalidade de espécies em lagos, etc. Os principais gases que formam a precipitação ácida são a amônia (NH<sub>3</sub>), os óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) e os óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>). O potencial de acidificação de uma substância *i* é definido pelo número de íons H<sup>+</sup> produzidos da substância em relação ao SO<sub>2</sub>. Desta forma todos os gases são expressos em kg SO<sub>2</sub> equivalente. A fórmula 4.1 identifica o cálculo para esta categoria de impacto.

$$AP_i = \frac{V_i/m_i}{V_{SO_2}/m_{SO_2}} \quad (4.1)$$

Onde:

$V_i/m_i$  = representa a relação entre o número de íons produzidos pela substância (i) por unidade de massa da mesma;

$V_{SO_2}/m_{SO_2}$  = representa a relação entre o número de íons produzidos pelo SO<sub>2</sub> por unidade de massa do mesmo;

- b) Aquecimento Global – Esta categoria está relacionada ao aumento da temperatura global devido a emissão de GEEs, provocada principalmente por atividades humanas, tendo como consequências, distúrbios climáticos, desertificação, secas, etc. Dentre os principais GEEs estão o CO<sub>2</sub>, o CH<sub>4</sub> e o N<sub>2</sub>O. Para analisar os impactos da emissão dos diferentes tipos de gases, cada um possui um indicador que refere-se ao seu potencial de aquecimento global em relação ao indicador de referência que é o CO<sub>2</sub>, portanto são quantificados em kg CO<sub>2</sub> equivalente.

De acordo com Guinée e Heijungs (1995) o cálculo para esta categoria é baseado no método da última reserva e a taxa de extração representada pela fórmula 4.2

$$\text{aquecimento global} = \sum_i GWP_i \times m_i \quad (4.2)$$

Com:

$$GWP_{T,i} = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt}$$

Onde:

$GWP_i$  = potencial de aquecimento global do gás (i);

$T$  = Horizonte de tempo (20, 100, 500 anos);

$a_i$  = força radiativa por unidade de massa do gás;

$c_i(t)$  = concentração do gás (i) em um tempo (t);

$a_{CO_2} c_{CO_2}(t)$  = força radiativa e concentração do CO<sub>2</sub> em um tempo (t);

- c) Depleção de Recursos Abióticos – Recursos abióticos podem ser classificados em três tipos: depósitos (combustíveis fósseis, minerais, etc.), reservas (solo e água) e fluxos (vento, água do rio, energia solar, etc). A depleção dos recursos está relacionada ao consumo destes recursos de forma insustentável. De acordo com Guinée e Heijungs (1995) o cálculo para esta categoria é baseado no método da última reserva e a taxa de extração representada pela fórmula 4.3

$$\text{depleção abiótica} = \sum_i ADP_i \times m_i \quad (4.3)$$

Com:

$$ADP_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \times \frac{(R_{ref})^2}{DR_{ref}}$$

Onde:

$ADP_i$  = potencial de depleção abiótica do recurso (i);

$m_i$  = quantidade do recurso (i) extraído em kg;

$R_i$  = última reserva do recurso (i) kg;

$DR_i$  = taxa de extração do recurso (i) em kg.y-1;

$R_{ref}$  = última reserva do recurso de referência (antimônio) em kg;

$DR_{ref}$  = taxa de extração do recurso de referência em kg;

A unidade de referência para esta categoria depende do recurso que está sendo avaliado, porém o mais comum é fazer a equivalência para o antimônio, ou seja, avalia-se a quantidade de antimônio equivalente para o recurso extraído.

- d) Ecotoxicidade da Água Doce – É a medida de efeitos tóxicos de produtos no ecossistema, neste caso na água doce, causando danos à qualidade do ecossistema e

extinção de espécies. A emissão de algumas substâncias tais como metais pesados, podem causar impactos no ecossistema. A análise destes impactos é feita conforme a máxima concentração tolerável destes materiais na água. A fórmula 4.4 representa os principais fatores considerados no cálculo desta categoria.

$$ETP_{i,ecom} = \frac{\sum_{fcomp} Fi,ecom,fcomp \times Ei,fcomp}{\sum_{fcomp} Frefi,refecom,fcomp \times Erefi,fcomp}$$

Onde:

$ETP_{i,ecom}$  = é o potencial de ecotoxicidade de uma unidade de emissão da substância (i) emitida para o compartimento ecomp;

$Fi,ecom,fcomp$  = é o fator destino que representa o transporte da substância (i) de um meio para outro e a sua degradação.

$Ei,fcomp$  = é o fator de efeito, ou seja, o efeito tóxico que um ecossistema sofre ao ser exposto à substância (i) em um meio fcomp.

- e) Toxicidade Humana – Esta categoria de impacto refere-se aos impactos à saúde humana provocados pela presença de substâncias tóxicas no ambiente. Alguns elementos tóxicos como arsênio, dicromato de sódio e fluoreto de nitrogênio são produzidos pela queima de combustível fóssil. Estes são produtos químicos potencialmente perigosos quando inalados, ingeridos ou em contato com a pele. Esta categoria de impacto é medida equivalente de 1,4 diclorobenzeno (kg 1,4 – DCB eq) (OLIVEIRA, 2016). A fórmula 4.5 calcula o potencial de toxicidade humana.

$$HTP_{i,ecom} = \frac{\sum_{fcomp} \sum_r Fi,ecom,fcomp \times Ti,fcomp,r \times Ir \times Ei,r}{\sum_{fcomp} \sum_r Frefecom,fcomp \times Tref,fcomp,r \times Ir \times Erefi,r} \quad (4.5)$$

Onde:

$HTP_{i,ecom}$  = refere-se ao potencial de toxicidade humana da substância (i) emitida para o compartimento (ar, água ou solo);

$Fi,ecom,fcomp$  = é o fator destino que representa o transporte da substância (i) de um meio para outro e a sua degradação.

$Ti,fcomp,r$  = é o fator de transferência que representa a rota de transferência da substância (i), pela rota (r), por exemplo, água de beber, peixe, plantas, etc.

$Ir$  = é o fator dose, que diz respeito à dose de exposição humana via rota (r);

$Ei,r$  = é o fator efeito, ou seja, o efeito tóxico da dose da substância (i) via modo de exposição (r).

O denominador representa os parâmetros utilizados para a substância de referência no caso o 1,4 diclorobenzeno (kg 1,4 DCB eq).

### 4.3.2 Análise *endpoint* – método ReCiPe

O objetivo do método ReCiPe é facilitar a interpretação da longa lista dos resultados em um número limitado de indicadores. Os 18 indicadores *midpoint* são expressos em 3 indicadores *endpoint*. O método utiliza os mecanismos ambientais como base para modelar. Um mecanismo ambiental é uma série de efeitos que juntos podem causar um nível de dano ao ecossistema ou a saúde humana. Por exemplo, para a mudança climática, sabemos que uma série de substâncias podem aumentar a força radiativa, isso significa que o calor é impedido de ser irradiado da terra para o espaço. Como resultado, mais energia está presa na terra, e a temperatura aumenta. Como resultado podemos esperar mudanças nos habitats para organismos vivos, e extinção de espécies. Para cada categoria modelada, seus fatores específicos que influenciam o dano final são modelados.

A motivação para o cálculo do *endpoint*, é que o grande número de indicadores do ponto médio são muito difíceis de interpretar, em parte por serem muitos, em parte porque eles têm um significado muito abstrato. Os indicadores em nível *endpoint* se destinam a facilitar a interpretação, uma vez que existem apenas três, e eles têm um significado mais compreensível. Este método quantifica as categorias em pontos, representando a unidade final para qualquer categoria.

As 3 categorias *endpoint* analisadas pelo método ReCiPe são descritas resumidamente a seguir. Maiores informações sobre os métodos utilizados para caracterização *endpoint* podem ser consultadas Goedkoop *et al.* (2009).

- a) Danos para saúde humana – *damage to Human Health* (HH). A ACV utiliza o conceito de “anos de vida ajustados por incapacidade” – DALY, representados com a unidade em anos, para medir a qualidade ou danos à saúde humana. DALY é a soma de anos de vida perdidos (YLL) e anos de vida como incapaz (YLD), podendo ser representado pela fórmula 4.6.

$$DALY = YLL + YLD \quad (4.6)$$

$$e \quad YLD = w \times D$$

onde:

w = é um fator ente 0 (saúde completa) e 1 ( morte);

D = duração da doença.

- b) Danos ao ecossistema – *damage to Ecosystem Diversity* (ED). A unidade utilizada para esta categoria é representando pela “perda de espécies durante um ano, em uma determinada área” - *Potentially Disappeared Fraction of Species* (PDF). O fator de caracterização *endpoint* desta categoria é calculado pela soma dos PDFs (terrestres, da água doce e marinhas) multiplicadas pela densidade de espécies, podendo ser representado pela equação da formula 4.7.

$$CF_{ED} = PDF_{terr} \times SD_{terr} + PDF_{fw} \times SD_{fw} + PDF_{mw} \times SD_{mw} \quad (4.7)$$

Onde:

$CF_{ED}$  = fator de caracterização *endpoint* para danos ao ecossistema;  
 $PDF_{terr}$  = fator de caracterização em PDF.m<sup>2</sup>.ano de espécies terrestres;  
 $SD_{terr}$  = fator de densidade de espécies terrestre por m<sup>2</sup>;  
 $PDF_{fw}$  = fator de caracterização em PDF.m<sup>3</sup>.ano de espécies de água doce;  
 $SD_{fw}$  = fator de densidade de espécies de agua doce por m<sup>3</sup>;  
 $PDF_{mw}$  = fator de caracterização em PDF.m<sup>3</sup>.ano de espécies marinhas;  
 $SD_{mw}$  = fator de densidade de espécies marinhas por m<sup>3</sup>;

- c) Danos aos recursos naturais – *damage to Resource Availability* (RA). Esta categoria inclui os recursos fósseis e minerais, contabilizando o aumento de custos necessário para extrair estes recursos e torna-los úteis, à medida que diminui sua disponibilidade. O método ReCiPe caracteriza este impacto através do aumento marginal dos custos devido à extração de um determinado recurso. Para tanto, utiliza uma função que reflete o aumento marginal do custo de extração devido aos efeitos decorrentes da extração contínua. Em termos de minerais, o efeito da extração é a diminuição do teor médio de minério, enquanto que para os recursos fósseis, o efeito é que não só combustíveis fósseis convencionais, devem ser explorados, mas também os menos convencionais para atender a demanda crescente. O aumento do custo marginal (MCI) é o fator que representa o aumento do custo de uma commodity (r) (U\$/kg), devido à extração ou produção (kg) do recurso (r). Desta Forma, o valor presente do custo (PVC) do MCI devido à extração de um quilograma de recurso (r) ao longo de um tempo T (em \$ / kg), levando em consideração uma taxa de desconto d, pode ser escrito como a fórmula 4.8.

$$PVC_r = \sum T \frac{P_{r,t} \times MCI_r}{(1 \pm d)^t}$$

O quadro 4.1 mostra a relação entre os indicadores *midpoint* e os indicadores *endpoint* categorizados pelo método ReCiPe.

Quadro 4.1 - Relação entre os indicadores *midpoint* e *endpoint*, que possuem ligação quantitativa no método ReCiPe 2008.

Categoria de impacto <i>midpoint</i>	Categoria de impacto <i>endpoint</i>		
	HH	ED	RA
Mudança de clima	X	X	
Depleção do ozônio	X		
Acidificação terrestre		X	
Eutrofização da água doce		X	
Eutrofização marinha			
Toxicidade humana	X		
Formação de oxidação fotoquímica	X		
Formação de matéria particulada	X		
Ecotoxicidade terrestre		X	
Ecotoxicidade da água doce		X	
Ecotoxicidade marinha		X	
Radiação ionizante	X		
Ocupação de terras agrícolas		X	
Ocupação de terras urbanas		X	
Transformação de áreas naturais		X	
Depleção da água			
Depleção de recursos fósseis			X
Depleção de recursos minerais			X

Fonte: Adaptação de (GOEDKOOPE *et al.*, 2009a)

Um exemplo de interpretação do quadro é que uma das causas dos danos à saúde humana (HH) e ao ecossistema (ED), é a mudança de clima. Assim como a depleção do ozônio, a toxicidade humana, a formação de oxidação fotoquímica, a formação de matéria particulada e a radiação ionizante causam também danos à saúde humana. A acidificação e a eutrofização terrestre e da água doce, bem como a ocupação de terras agrícolas e urbanas, influenciam na qualidade do ecossistema. A escassez de recursos fósseis ou minerais leva ao aumento dos custos para tornar estes recursos disponíveis para o uso. E desta forma, os fatores *midpoint* levarão a algum dano para as categorias *endpoint*.

#### 4.4 QUARTA ETAPA: DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A quarta etapa do processo de ACV é a interpretação dos resultados, que neste trabalho está registrada nos capítulos onde são apresentadas as discussões referentes aos resultados encontrados e a conclusão.

A ACV para UHE de Curuá-Una está documentada no capítulo 5, a seguir, orientada pelas recomendações previstas pela ISO 14040 (ISO, 1997), seguindo o modelo da figura 4.1. A interpretação dos resultados e recomendações são apresentadas no capítulo 6, juntamente com as discussões do trabalho.

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA HIDRELÉTRICA DE CURUÁ-UNA

Neste capítulo será apresentada a ACV para a UHE de Curuá-Una/Santarém-PA, seguindo as etapas propostas pelas normas ISO 14040/14044, com as adequações necessárias definidas pela metodologia que foi descrita no capítulo 4.

#### 5.1 OBJETIVO GERAL E ESCOPO

As seções a seguir cumprem a primeira etapa da ACV, descrevendo o sistema, seu objetivo, escopo, unidade funcional, fronteira, bem como a escolha do método de Análise de Impacto.

##### 5.1.1 Caracterização da Hidrelétrica (UHE) de Curuá-Una

A UHE de Curuá-Una situa-se 70 km da cidade de Santarém-PA/Brasil ( $2^{\circ} 47' 22''$  S e  $54^{\circ} 17' 30''$  W), como apresenta o mapa da figura 5.1.

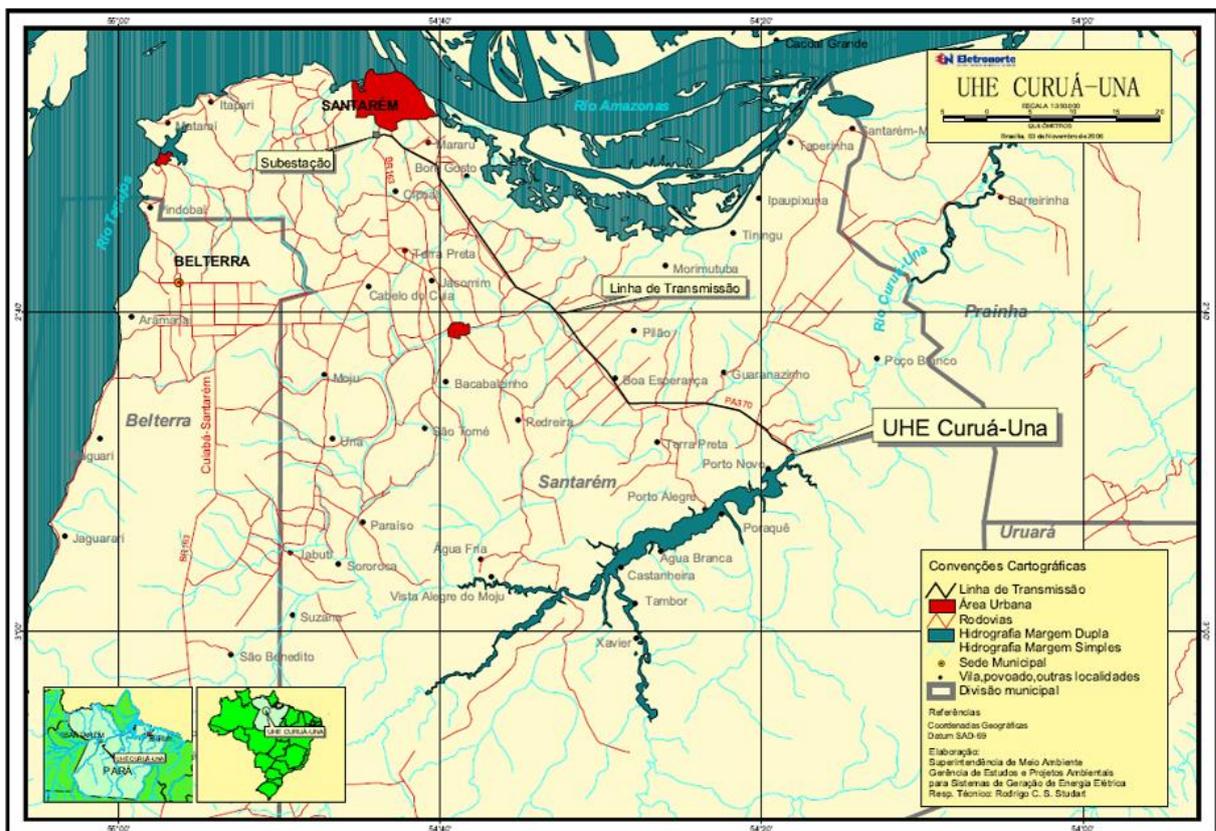


Figura 5.1 - Mapa de localização da UHE de Curuá-Una.  
Fonte (STUDART, 2006).

A maior parte (57,4%) do reservatório está inserida na Bacia do Rio Curuá-Una, como mostra a figura 5.2, que é afluente da margem direita do rio Amazonas. Apenas uma pequena parte se encontra em bacias de outros afluentes como o Rio Moju (11,7%), Mojuí (4,4%), e Poraquê (3,2%), e em vários igarapés menores (2,9%) (FEARNSIDE, 2005).



Figura 5.2 - Vista aérea da UHE de Curuá-Una.

Fonte: Foto concedida pelo coordenador de manutenção e meio ambiente da divisão de geração hidráulica da UHE de Curuá-Una

Uma característica marcante da UHE de Curuá-Una é o fato de estar implantada em terreno arenoso, e ser a primeira usina projetada do mundo ocidental com estas características. Saré, Ligocki e Sayão (2003) descrevem o fato como “A construção da usina foi um desafio como obra de engenharia, por ser a primeira obra desta natureza no Brasil em terreno arenoso, conferindo características diferentes de outras obras do gênero”. “Esta é a 2<sup>a</sup>. usina do mundo construída em terreno arenoso, portanto todo o empreendimento foi construído em cima de maciço constituído de argila arenosa (média de 65% argila e 35% areia)”(PEDREIRO, 2015).

O reservatório encheu pelo período de janeiro a maio de 1977, sendo a usina inaugurada em 19/08/1977, com apenas duas turbinas (1<sup>a</sup> etapa – unidades 1 e 2). A 3<sup>a</sup>. turbina (2<sup>a</sup>. etapa - unidade 3) iniciou sua operação em 24/09/1985. A 3<sup>a</sup>. etapa está prevista para ser concluída em 2017 com o início da operação da 4<sup>a</sup>. turbina, conferindo uma potência de 42,8 MW. Atualmente a UHE opera com 3 turbinas, tendo uma potência total de 30,3 MW, sendo

considerada, segundo as normas brasileiras uma hidrelétrica grande<sup>21</sup> (CONGRESSO NACIONAL, 1998). O principal objetivo do empreendimento foi atender a demanda da cidade de Santarém e do município de Aveiro, com a expectativa de crescimento do mercado consumidor, exploração de riquezas minerais e recursos naturais, bem como do setor do agronegócio. Porém, com o crescimento da região maior do que o esperado, foi necessário o atendimento da demanda pelo sistema de Tucuruí, instalado no Rio Tocantins. A empresa proprietária e responsável pela operação da usina, desde 2005, é a Eletronorte (Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A).

Os elementos que compõe a UHE de Curuá-Una, como apresentado na ficha técnica disponibilizada no ANEXO A – Ficha Técnica da UHE de Curuá-Una, são descritos resumidamente a seguir e apresentados no mapa da figura 5.3. Para definições técnicas e especificações mais detalhadas consulte (GULLIVER e ARNDT, 1991).

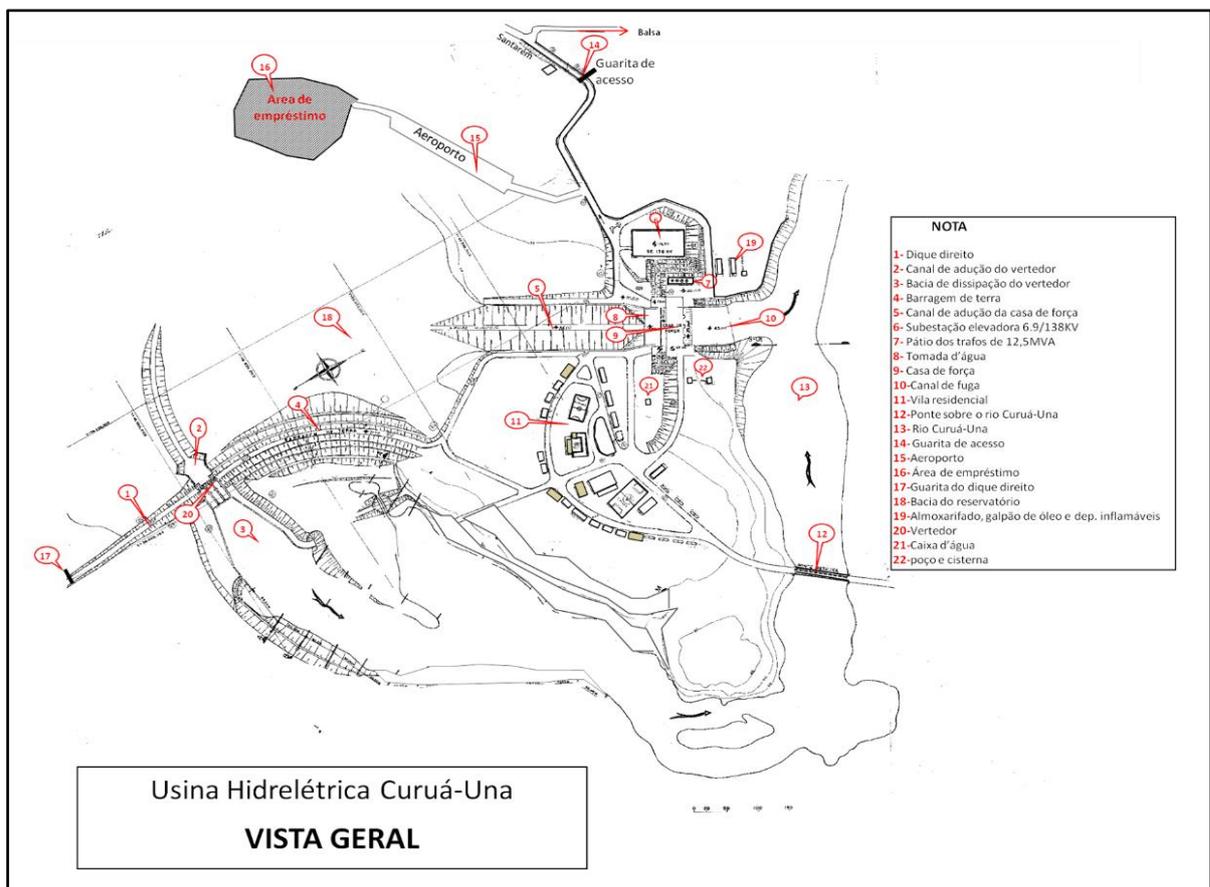


Figura 5.3 - Planta da UHE de Curuá-Una.  
Fonte: (OGH, 2015)

<sup>21</sup> Segundo Kumar *et al.* (2011) uma hidrelétrica é classificada em pequena hidrelétrica ou grande hidrelétrica de acordo com a capacidade instalada. Esta classificação varia conforme as leis de cada país. No Brasil uma hidrelétrica é considerada pequena quando tem menos que 30 MW de capacidade instalada.

Elementos de infraestrutura:

- a) Barragem Principal. Barragem de terra zoneada com núcleo central impermeável, fechando a parte central do rio, ligando o vertedor à margem direita do canal adutor da casa de força. Tem comprimento total da crista de 600m, altura máxima de 26m e cota da crista de 71m.
- b) Conduto forçado. A UHE de Curuá-Una não possui conduto forçado de aço e sim 4 túneis de adução em concreto, com seção retangular de 12 m de comprimento.
- c) Tomada de água. Estrutura de concreto incorporada à casa de força, situada a margem esquerda do rio. Compreende 4 tomadas individuais, providas de grades de proteção e *stop-logs*<sup>22</sup>. Tem comprimento total de 64m (sentido longitudinal) e 80m (sentido transversal). A altura máxima é de 35m.
- d) Casa de força. Abrigada em estrutura de concreto, possui largura de 48m e comprimento 96m. Abriga 4 unidades geradoras 3 em operação e 1 a ser montada.
- e) Canal de adução. Tem seção transversal de formato trapezoidal, com a base menor medindo 6m e a base maior medindo 62m. Comprimento total de 340m sendo parte em concreto armado, parte em revestimento de concreto simples e parte de enrocamento.<sup>23</sup>
- f) Canal de fuga. Canal revestido em concreto a céu aberto de seção retangular a partir da extremidade dos tubos de sucção das turbinas. Com comprimento aproximado de 68m e largura na seção inicial de 60m é dimensionado para vazão correspondente a quatro grupos geradores.
- g) Vertedor. Situa-se na margem direita do rio, construído em concreto armado com comprimento total de 46m. Possui três vãos equipados com comportas do tipo setor e 3 *stop-logs* e é dimensionado para escoamento de vazão máxima de 2000m<sup>3</sup>/s.
- h) Bacia de Dissipação – Recebe a água do vertedouro, tem comprimento de 80m em concreto armado, onde é feita a dissipação da energia hidráulica por meio de ressalto hidráulico.

---

<sup>22</sup> Stop-logs – comportas de manutenção.

<sup>23</sup> Enrocamento - conjunto de blocos de pedra ou de outro material (p.ex., cimento), lançados uns sobre os outros dentro da água para servir como lastro para fundação de obra hidráulica ou, quando aflorado à superfície ou muito extenso, como quebra-mar ou proteção contra a erosão das ondas.

Equipamentos:

- a) Turbinas – 3 turbinas do tipo Kaplan, com eixo vertical e potência nominal de 14.000 HP, velocidade (rotação síncrona) de 200 rpm, rendimento máximo de 92,89% na queda de 21,7m. Potência nominal unitária de 10,3 MW, vazão máxima e nominal por unidade de 65m<sup>3</sup>/s e 52m<sup>3</sup>/s respectivamente. O peso é de 23.600 Kg por unidade sem o óleo.
- b) Gerador – 3 geradores com potência nominal máxima de 12,5 MVA<sup>24</sup> para o equipamento 1 e 2, e 10,84 MVA para o equipamento 3. O fator de potência para as unidades 1 e 2 é de 0,80φ e para a unidade 3 é de 0,95φ. O peso por gerador é de 31.952 kg.
- c) Subestação elevadora: Possui 3 transformadores com estrutura de entrada de 6.9 kV elevada para 138 kV. O peso de cada transformador é de 29.550 kg com o óleo.
- d) Linhas de transmissão: Circuito simples, 68,8 km de extensão até a cidade de Santarém, com tensão de 138 kV.

Além destes equipamentos ainda fazem parte do complexo UHE de Curuá-Una, transformadores para serviços auxiliares, comportas de emergência e pórticos rolantes, como consta na transcrição das informações prestadas pelos Sr. Mário Pedreiro (PEDREIRO, 2015).

Uma característica importante de uma usina hidrelétrica com reservatório é a quantidade de energia produzida em relação à área alagada. A tabela 5.1 apresenta esta informação da UHE de Curuá-Una e de outras UHEs situadas na região amazônica.

Tabela 5.1. Relação área do reservatório pela capacidade de UHEs

UHE	UF	Pot. Nominal (MW)	Área máx. alagada (km <sup>2</sup> )	Razão área alagada/pot nominal (km <sup>2</sup> /MW)
Curuá_Una	PA	30,3	102	3,3
Tucuruí	PA	8370	3023,90	0,361
Balbina	AM	250	2532,34	10,129
Jirau	RO	3750	309,46	0,083
Belo Monte	RO	4500	516	0,115
S. Luiz do Tapajós*	PA	6356	711,25	0,113

(\*) Esta UHE ainda não está em funcionamento.

Observa-se uma razão menor nas hidrelétricas de Jirau, Belo Monte, Tucuruí e São Luiz do Tapajós e maior razão para a UHE e Balbina. Curuá-Una se apresenta na média entre as de menor e maior razão entre a área ocupada e sua potência.

A tabela 5.2 apresenta de forma resumida as características da UHE de Curuá-Una.

<sup>24</sup> MVA – Mega Volt Ampère – potência aparente - potência total fornecida pela fonte.

Tabela 5.2- Características Gerais da UHE de Curuá-Una.  
Adaptado da Ficha Técnica da UHE de Curuá-Una (OGH, 2015)

Componente	Descrição/valor
<b>Reservatório</b>	
Área inundada no NA normal	102 km <sup>2</sup>
Volume do reservatório	472 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Profundidade média do reservatório	68m
Área de drenagem	13.600 km <sup>2</sup>
Vazão mínima média mensal	45 m <sup>3</sup> /s
Vazão MLT (Média a Longo Termo)	185 m <sup>3</sup> /s
Vazão firme 95%	91 m <sup>3</sup> /s
<b>Barragem</b>	
Tipo	Terra zoneada com núcleo central impermeável
Comprimento total da crista	600m
Altura máxima	26m
Cota da crista	71m
<b>Tomada de água</b>	
Tipo	Incorporada à casa de Força
Altura	35 m sobre as fundações
Comprimento total	64 m
<b>Casa de força</b>	
Tipo	Abrigada
Unidades geradoras	4 (sendo 3 em operação e 1 a ser montada)
Largura	48 m
Comprimento	96 m
<b>Canal adutor</b>	
Seção	Trapezoidal
Comprimento	340 m
Altura	14 m
<b>Vertedouro</b>	
Tipo	Setor
Capacidade	2000 m <sup>3</sup> /s
Largura	10m
Altura	10,26m
Comprimento	46 m
<b>Turbinas</b>	
Tipo	Kaplan
Quantidade	3 unidades
Potencia nominal unitária	3 x 10.3 MW
Rendimento máximo	92.89% na queda de 21,7 m
<b>Instalações de Transmissão</b>	
Extensão	68,8 km
Tensão	138 KV

### 5.1.2 Objetivo da ACV da UHE de Curuá-Una

O objetivo da ACV da UHE de Curuá-Una é obter informações sobre os impactos ambientais causados por uma pequena hidrelétrica na região norte do Brasil, disponibilizando dados para posterior comparação com ACVs de outras fontes de energia como a termelétrica, a fotovoltaica, a solar, etc. Considera-se que a integração de diferentes tecnologias na produção de energia é uma das alternativas para o atendimento da demanda crescente no Brasil. Porém, estudos mais detalhados devem ser realizados para que se execute projetos dentro do contexto da sustentabilidade. A metodologia da ACV possibilita este detalhamento.

### 5.1.3 Fronteira do Sistema

Para definir a fronteira do sistema foi necessário abordar fatores diversos que são especificados a seguir:

- a) Fronteira Geográfica - a unidade estudada, UHE de Curuá-Una, localiza-se na cidade de Santarém – PA. A cidade de Santarém localiza-se a 2° 47' 22" de latitude sul e 54° 17' 30" de longitude oeste, na região do oeste paraense, na margem direita do rio Tapajós, na confluência com o rio Amazonas. Dista cerca de 807 Km, em linha reta, da capital do Estado. O clima dominante na região é quente e úmido, característico das Florestas Tropicais, com temperatura média variando entre 25°C a 28°C e precipitação média anual de 1920 mm. (IBGE, 2011).
- b) Fronteira em relação ao tempo – Os dados coletados correspondem à realidade de 39 anos a partir da sua implantação. Porém, na análise de impacto considerou-se os impactos provocados para um cenário de 100 anos de funcionamento da usina, padrão utilizado pelos estudos de ACV de hidrelétricas, como em Pang *et al.*, (2015); Brizmohun, Ramjeawon e Azapagic (2015); Dones *et al.*, (2007); Santoyo-Castelazo, Gujba e Azapagic (2011); dentre outros. Para esta projeção, foi necessário calcular o que seria consumido de insumos e o que a usina produzirá aproximadamente em 100 anos.
- c) Fronteira em relação as etapas da ACV - Considerou-se a etapa da construção incluindo a aquisição da matéria prima, uso da terra, transporte, consumo de energia e consumo de combustível. Para a etapa de operação foi relacionado o fluxo da água, o consumo de energia para funcionamento dos equipamentos, consumo de óleo lubrificante, e combustível para os veículos. Como manutenção foi considerada a potencialização da usina com a implantação da 4ª. turbina. Como não há relatos de experiências de desativação de UHEs, o processo de descarte de material não é conhecido e para estes casos é recomendado pelos autores Frischknecht *et al.*, (2007), o uso do fluxo padrão para descarte de concreto e outros materiais. A transmissão e distribuição não foram incluídas no escopo deste trabalho, pois é necessário que estudos específicos de ACV destas atividades sejam realizados. A figura 5.4 mostra graficamente a fronteira do sistema em uma visão conceitual.

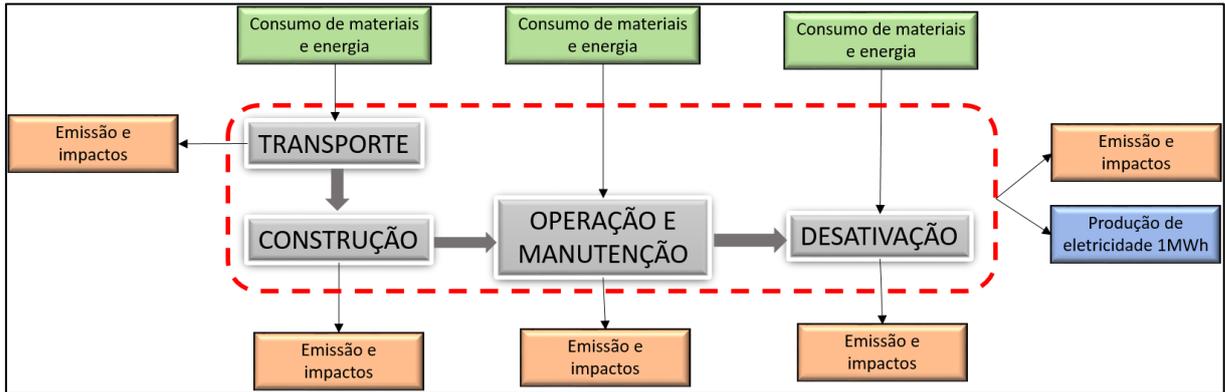


Figura 5.4 - Visão conceitual da fronteira do sistema para ACV da UHE de Curuá-Una.

### 5.1.4 Unidade Funcional

A unidade funcional em uma ACV é a medida da performance ou função de saída de um sistema de produção. O objetivo principal é ter uma referência, na qual as entradas e as saídas estarão relacionadas, facilitando assim a comparação com ACVs de diferentes sistemas (ISO, 1997).

Para definir a unidade funcional, é necessário considerar o objetivo do estudo: se o objetivo for a análise do sistema energético no cumprimento da demanda da sociedade (análise consequential), a unidade funcional deve ser em função de um serviço energético oferecido, como eficiência de iluminação, aquecimento, etc. Se o objetivo é formar uma base de dados para ser utilizada em outros estudos (análise atribucional), como é o caso desta pesquisa; a unidade funcional deve representar a energia gerada medida em kWh, MWh, MJ, etc. (RIBEIRO, 2004). Neste trabalho será utilizada a unidade funcional Megawatts/hora (MWh). Todos os dados coletados e inseridos no estudo, deverão ser em relação à esta quantidade de energia produzida, disponibilizando de forma coerente o estudo para comparações com a ACVs de outros sistemas, para avaliação de diferentes cenários de produção, para proposta de integração com outras tecnologias de produção de energia, para submeter a um processo de otimização, etc.

### 5.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV

Realizar um inventário, compreende a atividade de coleta minuciosa de dados que irão compor o registro real do que se está inventariando. Conforme definição da ISO 14040, inventário é a compilação e a quantificação de entradas e saídas de um dado produto através de seu ciclo de vida. Desta forma o ICV terá que obter as características e os dados pormenorizados do objeto inventariado, no caso a UHE de Curuá-Una, para serem compilados e quantificados,

servindo de base para análise na próxima fase da ACV. Portanto, quanto mais completos e reais os dados obtidos, mais confiáveis serão os resultados.

Os dados primários deste inventário, ou seja, obtidos diretamente através do contato pessoal com técnicos nas visitas realizadas na UHE de Curuá-Una, foram organizados em processos, juntamente com os dados obtidos de pesquisas bibliográficas, planilhas, entrevistas com especialistas, acesso às indústrias montadoras de equipamentos, etc. De posse destes dados, foi necessário especificar um modelo que os incluíssem nas etapas de Construção, Operação, Manutenção e Desativação da usina. Um modelo bastante representativo e utilizado como base por outros trabalhos de ACVs de hidrelétrica é o modelo especificado pela empresa Vattenfall AB (BRÄNNSTRÖM-NORBERG *et al.*, 1996), o qual, após a sua validação e adaptação para o contexto estudado, serviu como modelo para o ICV da UHE de Curuá-Una. A figura 5.5 mostra os insumos inventariados para ACV da UHE de Curuá-Una que foram organizados dentro de cada etapa.

Alguns processos foram inseridos, outros foram unidos para que pudessem ser inventariados considerando os processos já existentes no Ecoinvent 3.1 e 3.2. A base de dados do Ecoinvent 3.1 disponibiliza mais de 11.500 processos, somados de alguns processos novos e atualizados da versão 3.2. Não é objetivo do trabalho descrever como estes processos são construídos ou calculados, pois já são consolidados para utilização em diversos contextos, porém para melhor especificar a localização geográfica escolhida para os processos segue uma descrição de como esta característica é considerada.

Os processos que são inventariados para locais específicos levam a sigla de seus países. Os processos inventariados com dados globais levam a sigla GLO, os que consideram dados somente da Europa possuem a sigla RER e os utilizados neste trabalho possuem a sigla RoW (*rest of world*). Conforme Weidema *et al.* (2013), uma atividade inventariada para sigla RoW é calculada automaticamente como sendo:  $RoW = GLO - RER - outras\ localidades\ específicas$ , desta forma representando a maior parte dos países da América do Sul, quando não há processos específicos para uma dada localidade.

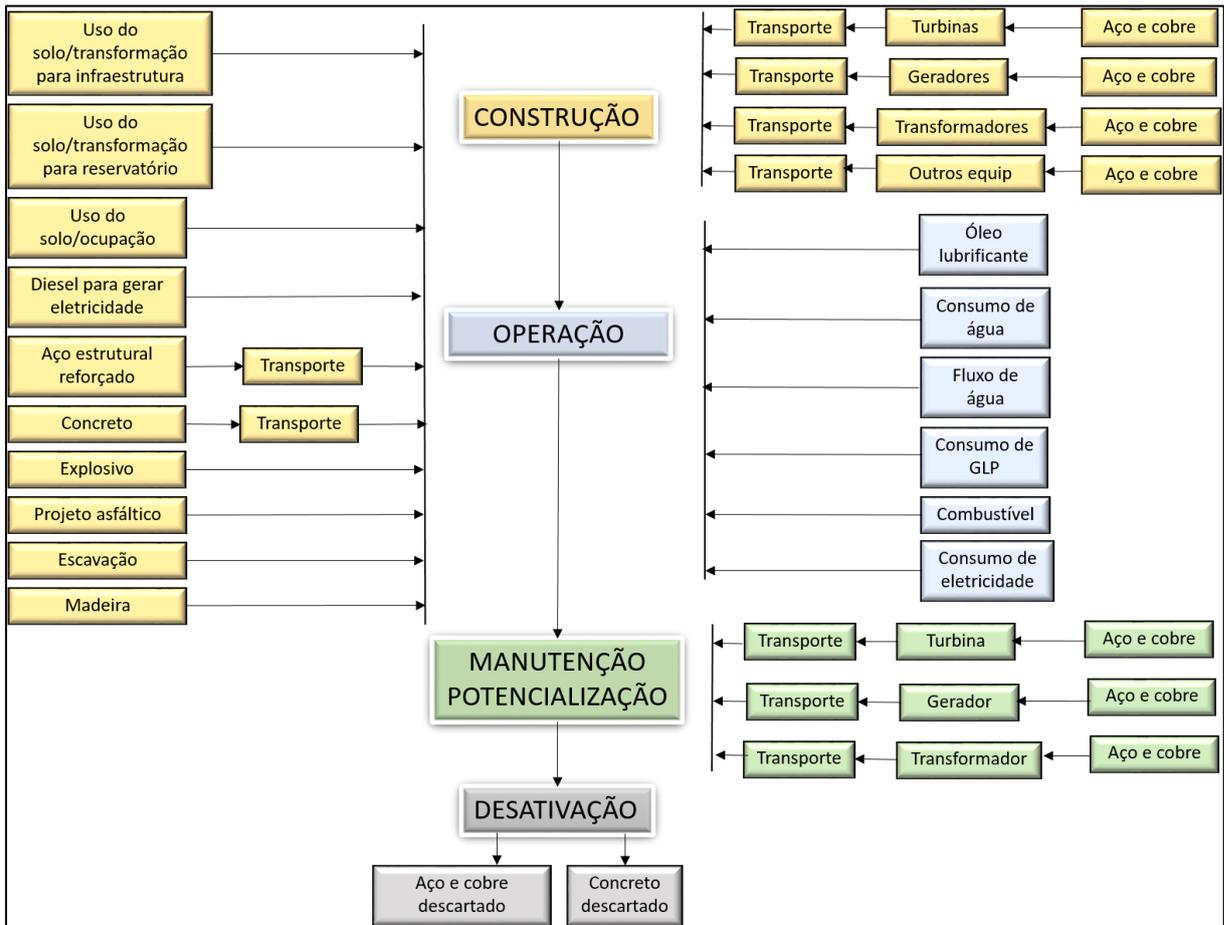


Figura 5.5 - Fronteira do sistema especificando os processos incluídos no ICV da UHE de Curuá-Una. Adaptado de (BRÄNNSTRÖM-NORBERG *et al.*, 1996).

Nos itens seguintes (5.2.1 a 5.2.5) são descritos os processos com os fluxos correspondentes utilizados, que estão disponíveis no Ecoinvent, a origem dos dados, e as informações necessárias para conferir credibilidade ao inventário. Para cada item relacionado no inventário, foram calculadas as quantidades consumidas nas quatro etapas do ACV para o cenário de 100 anos de operação da usina. Foi necessário calcular também para cada item, a quantidade de cada insumo relativo a 1 MWh (unidade funcional), de maneira similar ao apresentado no exemplo das tabelas 3.1 e 3.2 do capítulo sobre a metodologia. A tabela 4.4 contém o resultado dos cálculos.

### 5.2.1 Construção

A fase de Construção da obra durou nove anos. Alguns insumos incluídos nesta fase constituem-se como totais para os 100 anos, como por exemplo uso do solo, concreto, aço estrutural, madeira, etc. Outros foram calculados para os 9 anos da construção, como por exemplo o consumo de óleo diesel para as máquinas que operaram na obra. Ressalta-se que para este inventário muitos dados foram fornecidos pelos gestores e administradores da UHE

de Curuá-Una, sendo calculados e convertidos para serem adaptados ao uso pela base de dados do Ecoinvent.

- a) Uso do solo/transformação para reservatório. Conforme Flury e Frischknecht (2012), a maior parte do uso da terra em uma hidrelétrica com reservatório é devido a área inundada. A área inundada da UHE de Curuá-Una, conforme ficha técnica (OGH, 2015), tem **102 km<sup>2</sup>** de extensão. Na base de dados do Ecoinvent 3.1 utilizou-se o fluxo “*transformation, to water bodies, artificial*”, conforme recomenda (DONES, ROBERTO *et al.*, 2007).
- b) Uso do solo/transformação para infraestrutura. Conforme Flury e Frischknecht (2012), a área utilizada para construções e infraestrutura é muito menor, se comparada com a do reservatório. Segundo os autores, a média calculada para este fim corresponde a 1% da área do reservatório, somando-se a barragem, as construções para a infraestrutura da UHE, as rodovias, etc. Conforme os dados fornecidos por Pedreiro (2015) e que constam na ficha técnica a UHE de Curuá-Una (OGH, 2015), a área utilizada para infraestrutura compreende todas as construções de apoio, como escola, alojamento, residências, etc., e está especificada na tabela 5.3, totalizando **0,135 km<sup>2</sup>**. Esta infraestrutura é modelada na base Ecoinvent como “*transformation, to industrial area, built up*” (DONES *et al.*, 2007; FLURY e FRISCHKNECHT, 2012).

Tabela 5.3 - Área ocupada pela infraestrutura da UHE de Curuá-Una.

Descrição	Área Ocupada (m <sup>2</sup> )
Residências, escolas, hotel de trânsito, alojamento, igreja, ambulatório.	21.100
Almoxarifado	7.700
Subestação de 138 kV	11.000
Subestação de 13.8 kV	168
Casa de força	3.312
Canal de adução da casa de força	13.400
Canal de fuga da casa de força	4.608
Vertedouro, incluindo a bacia de dissipação e canal de adução	8.746
Barragem e dique direito	30.500
Projeto asfáltico	35.000
<b>TOTAL</b>	<b>135.534</b>

Fonte: (OGH, 2015)

- c) Uso do solo/ocupação. Como ocupação, considera-se toda área ocupada pela UHE de Curuá-Una, relativa ao tempo de uso. Portanto a área de 4.000 km<sup>2</sup> que está caracterizada como “área total de segurança da UHE de Curuá-Una”, conforme ficha técnica, foi multiplicada pelo tempo de 100 anos, tendo como resultado **400.000 km<sup>2</sup> ×**

- a (quilômetros quadrados multiplicados pelo tempo em anos). O fluxo utilizado na base de dados do Ecoinvent foi “*Occupation, tropical rain forest*”.
- d) Diesel para gerar eletricidade. Conforme dados fornecidos por Pedreiro (2015), eram consumidos 55.000 litros de óleo mensais, sendo que 22.000 eram para os 3 geradores. Seis anos e meio ficaram as máquinas e os geradores e mais 3 anos, somente os geradores, portanto o cálculo foi realizado da seguinte forma: 55.000 litros/mês consumidos em seis anos e meio, totalizam 4.290.000 litros. Nos 3 anos restantes da construção a maior parte do óleo é consumida pelos geradores; 22.000 l/mês totalizando 792.000 l. Somando as quantidades tem-se um total de consumo de óleo diesel de 5.082.000 l para os nove anos de construção. Considerando que 1 litro de diesel pesa 0,853 kg (NBR 14065:2013) tem-se um total de **4.319.700 kg de diesel**. Esta conversão foi necessária, pois os fluxos para o diesel na base de dados, “*diesel – RoW*”, estão representados em kg.
- e) Concreto. O maior consumo de concreto em uma UHE é na barragem (DONES, ROBERTO *et al.*, 2007), porém a barragem de Curuá-Una é do tipo enrocamento e não segue este padrão. Conforme OGH (2015), o concreto utilizado para a obra da UHE de Curuá-Una se encontra em quantidades significativas na tomada de água e casa de força, que totalizam **146.165 m<sup>3</sup> de concreto**. O fluxo do concreto utilizado na base do Ecoinvent para este componente “*concrete, normal – RoW*”, considera o concreto com densidade de 2.380 kg/m<sup>3</sup>, e constituído de cimento, água, areia e cascalho, portanto, estes elementos não estão especificados separadamente. O aço estrutural utilizado para compor o concreto está descrito no item f.
- f) Aço estrutural. Não há dados sobre o aço utilizado nas edificações da UHE de Curuá-Una. Para o cálculo desta quantidade utilizou-se dados de outros trabalhos. Doka (2007) afirma que a média aproximada que pode se considerar nas estruturas de hidrelétricas consiste em, “para 1 m<sup>3</sup> de estrutura de concreto, 3% são de aço estrutural”. Portanto, 146.165 m<sup>3</sup> de concreto contém 4.384,95 m<sup>3</sup> de aço estrutural. O peso específico do aço segundo Adão e Hemerly (2010) é 7.850 kg/m<sup>3</sup>, portanto, para as edificações foram utilizados, aproximadamente **34.421.857,50 kg de aço estrutural**. O fluxo utilizado para este tipo de aço na base Ecoinvent foi “*reinforcing steel, RoW*”.
- g) Escavação. Conforme Ribeiro (2004), na obra de uma usina são comuns diversas escavações, em função das características construtivas da mesma e da topografia da região.

Podem, além da escavação necessária para criação do canal de desvio, haver outras escavações como por exemplo o preparo das fundações para a construção de barragens de concreto e da casa de força. Basicamente podem-se dividir as escavações em três classes: comuns, em rocha e submersas (RIBEIRO, 2004).

Não se obteve a aproximação deste dado para UHE de Curuá-Una, portanto foi utilizado o cálculo realizado por Ribeiro (2004) e considerado no trabalho de Flury e Frischknecht (2012), considerando as proporções da área do reservatório apenas. Itaipu tem 1.350 km<sup>2</sup> de reservatório e 2,36E +7 m<sup>3</sup> de escavação. Para 102 km<sup>2</sup> do reservatório de Curuá-Una, obteve-se uma aproximação de **1.783.111 m<sup>3</sup> de escavação**. Como não se tem a informação dos tipos de escavação realizadas, considerou-se, o fluxo do Ecoinvent “*excavation, hydraulic digger - RoW*”.

- h) Explosivo. Embora não se tenha dados diretos do consumo de explosivos, a quantidade de explosivos utilizada está relacionada a quantidade de rocha (FLURY e FRISCHKNECHT, 2012). Por informação de Pedreiro (2015), a quantidade de rocha importa em 127.600 m<sup>3</sup> que foi utilizada para fabricação de concreto. Conforme informações encontradas no trabalho de Ribeiro (2004) são necessários 0,4 kg de explosivo por m<sup>3</sup> de rocha escavada, portanto, com 127.600 m<sup>3</sup> de rocha, são necessários **51.040 kg de explosivo**. O fluxo utilizado na base Ecoinvent para explosivo foi “*explosive, torvex – RoW*”.
- i) Projeto Asfáltico. A pavimentação asfáltica que atende a UHE de Curuá-Una, possui 3.500 m de comprimento com 10 m de largura e 0,07 m de espessura. Estas dimensões importam em 2.450 m<sup>3</sup> de asfalto. Considerando que 1 m<sup>3</sup> de asfalto padrão pesa 2.322,68 kg (BERNUCCI *et al.*, 2010), tem-se que 2.450 m<sup>3</sup> x 2.322,68 kg/m<sup>3</sup> = **5.690.566 kg**, sendo esta a quantidade aproximada de asfalto para pavimentação. O fluxo utilizado para este processo na base Ecoinvent foi “*mastic asphalt – RoW*”.
- j) Madeira. Na construção da UHE de Curuá-Una foi utilizada somente madeira para formas de concreto, na confecção de vigas, lajes, pisos, etc. e foram descartadas assim que curadas as estruturas, sendo a madeira predominante a Itaúba, a Jarana e o compensado de 2,5 mm. (PEDREIRO, 2015). Devido a falta de dados em relação à quantidade, foi necessária uma aproximação para o cálculo do compensado necessário para as formas. Conforme Pfeil (1985), o cálculo para madeira utilizada em formas é: 12 m<sup>2</sup> de madeira para cada m<sup>3</sup> de concreto. Com a espessura considerada de 2,5 mm tem-se 12 m<sup>2</sup> x 0,0025m = 0,03 m<sup>3</sup> de madeira para cada m<sup>3</sup> de concreto. Desta forma para 146.165 m<sup>3</sup> de concreto foram utilizadas aproximadamente **4.384,95 m<sup>3</sup> de madeira**. Não há dados suficientes para calcular o que foi utilizado da madeira tipo Itaúba e Jatana

nas estruturas como pernamancas, vigas, etc. Como a madeira foi retirada do próprio local, sem necessidade de processo industrial ou transporte, não se considera de grande influência o fluxo deste material. Na base do Ecoinvent, foi utilizado o fluxo “*sawnwood, board, softwood, raw, air dried - RoW*”.

- k) Turbinas. Conforme Flury e Frischknecht (2012), o aço é o segundo material mais influente na ACV de uma hidrelétrica. Na UHE de Curuá-Una há uma grande quantidade de aço nos equipamentos como turbinas, geradores, transformadores. Além do aço, o cobre figura como componente importante nos transformadores e geradores. As turbinas utilizadas na UHE de Curuá-Una são do tipo Kaplan, fabricadas pela Bardella-Nohab - SP, sendo que duas datam de 1977 e uma do ano de 1983 (PEDREIRO, 2015). Como não há dados precisos sobre cada turbina, considerou-se que o peso especificado na ficha técnica (OGH, 2015) tem como único componente o aço. Cada turbina pesa 23.600 kg, portanto a quantidade de aço para as três turbinas é de **70.800 kg**.
- l) Geradores. Dois geradores que operam na UHE de Curuá-Una são de fabricação da indústria *General Electric* com capacidade de 10 MW cada, e um gerador de fabricação da indústria Villares com capacidade de 10,3 MW. Da mesma forma para os geradores, o peso referenciado na ficha técnica para cada gerador é de 31.952 kg, totalizando para os três geradores 95.856 kg. Na falta de informação precisa sobre a quantidade de aço e cobre deste equipamento, seguiu-se o mesmo cálculo referenciado por Ribeiro (2004), que utiliza a porcentagem de aproximadamente 5% de cobre e 95% de aço para o gerador. Portanto, a quantidade de aço para os três geradores é de **91.063 kg** e a de cobre é **4.793 kg**.
- m) Transformadores. Conforme ficha técnica (OGH, 2015), o peso de um transformador é de 20.850 kg, sem o óleo, que será considerado a parte. Deste peso, boa parte é de aço e de cobre, porém não se tem este dado com exatidão. Na falta de dados, para obter a quantidade de aço e cobre, foi realizado o mesmo cálculo utilizado por Ribeiro (2004), que por sua vez aplicou o mesmo fator utilizado por Brännström-Norberg *et al.* (1996) que considera que um transformador é composto de 17,5% de cobre e 82,5% de aço. Desta forma tem-se um total de **10.946,25 kg de cobre** e **51.603,75 kg de aço** para os três transformadores.
- n) Outros equipamentos. Na UHE de Curuá-Una foram necessários outros equipamentos como: comportas, stop-logs, pórticos, ponte-rolante, grades de proteção, compressores, tubulação, dentre outros. Estes equipamentos são compostos, na maior parte de aço, em

sua estrutura (GULLIVER e ARNDT, 1991). Na falta de dados precisos, sobre a quantidade de aço de cada equipamento, optou-se por considerar o peso total como sendo constituído de aço. Os equipamentos estão descritos no APÊNDICE D – Planilha de cálculo do transporte, com seus respectivos pesos, totalizando **220.130 kg de aço**.

Na base de dados do Ecoinvent foi utilizado o fluxo “*steel, chromium steel 18/8 – RoW*” para o aço e “*copper – RoW*” para o cobre. A tabela 5.4 apresenta o total de aço e cobre para os equipamentos.

Tabela 5.4 - Quantidade de aço e cobre para os equipamentos da UHE de Curuá-Una.

<b>Equipamento</b>	<b>Quantidade de aço</b>	<b>Quantidade de cobre</b>
Turbina (3)	70.800	-----
Gerador (3)	91.063	4.793
Transformador (3)	51.603,75	10.946,25
Outros	220.130	-----
<b>TOTAL</b>	<b>433.596,75</b>	<b>15.739,25</b>

### 5.2.2 Operação

Nesta etapa serão inventariados os insumos utilizados para operação da UHE de Curuá-Una incluindo os mais significativos conforme planilha IGS 2015 (ELETRONORTE, 2015), como o óleo lubrificante, a eletricidade, o fluxo de água nas turbinas, o combustível para lanchas e camionetes e o gás GLP. Ocorreu uma manutenção da usina no período de 2011 a 2014, porém sem substituição de equipamentos pesados como turbinas e geradores, portanto sem influência para contabilidade geral dos processos.

- a) Óleo lubrificante/transformador. Este dado foi obtido através de registros existentes e disponibilizados por Pedreiro (2015). Cada transformador utiliza 11.300 litros de óleo, que equivalem a 10.060 kg. Conforme Pedreiro (2015) este óleo dura em média de 6 a 10 anos. No pior caso, supondo que o óleo dure o tempo de 6 anos, em 8 anos seriam necessárias no máximo 2 trocas de óleo, o que importaria em  $2 \times 20.120$  kg, totalizando 40.240 kg de óleo. Em 32 anos seriam necessárias aproximadamente 5 trocas de óleo. Seguindo o mesmo raciocínio, com 3 transformadores, seriam necessários 159.954 kg de óleo. Nos quarenta anos seguintes, seriam necessárias aproximadamente 6 trocas de óleo e os 4 transformadores consumiriam 241.440 kg de óleo. O total de óleo consumido para os 100 anos seria de **441.634 kg**. No Ecoinvent 3.1 o fluxo utilizado foi “*lubricating oil – RoW*”.
- b) Fluxo de água. O fluxo da água que atravessa a turbina foi calculado com base na vazão de  $52 \text{ m}^3/\text{segundo}$  por turbina (OGH, 2015). Sendo o  $\text{Volume} = Q(\text{vazao}) \times \text{tempo}$  tem-

se: em 8 anos (2 turbinas) um total de 26.237.952.000 m<sup>3</sup>; em 32 anos (3 turbinas), 157.427.712.000 m<sup>3</sup>. Para os 60 anos com 4 turbinas, calcula-se o volume aproximado de 393.569.280.000 m<sup>3</sup>, totalizando em 100 anos **577.234.944.000 m<sup>3</sup> de fluxo de água**. “*Water, turbine use, unspecified natural origin*” é o fluxo da base do Ecoinvent utilizado.

- c) Consumo de GLP<sup>25</sup>. A média anual de consumo de GLP, registrada na planilha IGS 2015 é de 1.560 kg, totalizando em 100 anos 156.000 kg, que equivalem a **6.240 m<sup>3</sup> de GLP** (ELETRONORTE, 2015). O fluxo utilizado na base do Ecoinvent foi “*liquefied petroleum gas - RoW*”.
- d) Combustível/gasolina/óleo. Neste componente foi incluída a média de consumo de gasolina e óleo 2 tempos para atividades administrativas e para os veículos rodoviários e náuticos, conforme informação da planilha IGS - 2015 (ELETRONORTE, 2015), totalizando um consumo de **262.650 kg** para 100 anos. O fluxo utilizado na base de dados do Ecoinvent foi “*heavy fuel oil - RoW*”.
- e) Combustível/óleo diesel. Neste componente foram incluídos a média de consumo de óleo diesel, para atividades administrativas e para os veículos rodoviários e náuticos, de acordo com a planilha IGS - 2015 (ELETRONORTE, 2015), totalizando um consumo de **2.752.266 kg** para 100 anos. O fluxo utilizado na base de dados do Ecoinvent foi “*diesel - RoW*”.
- f) Consumo de eletricidade. O consumo anual de eletricidade para atividades administrativas e para geração da usina importam em 1.408.624 kWh, que extrapolados para 100 anos totalizam **140.862.400 kWh**, conforme planilha IGS - 2015 (ELETRONORTE, 2015). O fluxo do Ecoinvent utilizado foi “*energy primary, from water power*”.

### 5.2.3 Manutenção/Potencialização

A potencialização da usina, prevista para o ano de 2017, com acréscimo de mais uma turbina, foi incluída como etapa de manutenção/potencialização. Considerou-se para a 4<sup>a</sup>. turbina, o 4<sup>o</sup>. gerador e o 4<sup>o</sup>. transformador a mesma quantidade de aço e cobre dos equipamentos anteriores. Portanto nesta fase, há um consumo de mais **71.155,25 kg de aço e 5.245,75 kg de cobre**.

---

<sup>25</sup> GLP – Gás Liquefeito de Petróleo, utilizado como combustível de aquecimento, como em fogões e veículos.

### 5.2.4 Transporte

A UHE de Curuá-Una está localizada a grandes distâncias dos centros de produção de equipamentos e materiais, e para trazer os equipamentos e materiais para infraestrutura da usina foi necessário utilizar os transportes rodoviário, fluvial e aéreo. De acordo com Pedreiro (2015), alguns equipamentos tais como turbinas e geradores foram trazidos de indústrias localizadas no estado de São Paulo por via rodoviária até a cidade de Belém, percorrendo aproximadamente 2.830 km, chegando na cidade de Santarém via fluvial, percorrendo aproximadamente 876 km. Outros tiveram origem na cidade do Rio de Janeiro, percorrendo 2.452,35 km. O cimento foi trazido da Venezuela, por estrada, percorrendo 2.237 km até a cidade de Manaus – AM e 739 km de balsa até a cidade de Santarém. Equipamentos tais como tratores, guindastes, caminhões, caminhonetes, caminhões caçamba, etc., vieram de São Paulo, utilizando transporte aéreo. Todo o material que chegou na cidade de Santarém seguiu via rodovia até o local da UHE de Curuá-Una (70 km). Para o cálculo do transporte, obteve-se o peso aproximado dos equipamentos e multiplicou-se pela distância percorrida, por cada tipo de transporte. Estes cálculos estão detalhados na tabela apresentada no APÊNDICE D – Planilha de cálculo do transporte terrestre, aéreo e fluvial.

- a) Transporte Terrestre. O transporte terrestre totalizou **43.996.739,56 t×km**. O fluxo utilizado na base de dados do Ecoinvent foi “*transport, freight, lorry, unespecified - RoW*”.
- b) Transporte Fluvial. O transporte fluvial totalizou **14.145.792,68 t×km**. O fluxo utilizado na base de dados do Ecoinvent foi “*transport, freight, inland waterways, barge - RoW*”.
- c) Transporte aéreo. O transporte aéreo totalizou **4.045.269,39 t×km**. O fluxo utilizado na base de dados do Ecoinvent foi “*transport, freight, aircraft - RoW*”.

### 5.2.5 Desativação

Como não há referências sobre o final do ciclo de vida de uma UHE, presume-se que estas não são removidas e sim abandonadas ou tem seus equipamentos e infraestruturas substituídos ou reformados. Alguns autores sugerem que parte dos equipamentos serão descartados e parte reciclados (FLURY e FRISCHKNECHT, 2012). Dones (2007) assume que as usinas quando desativadas, a infraestrutura e as barragens permanecem no local. Por esta razão ele considera que todo o material, como primeira aproximação, deverá ser incluído em um fluxo de descarte. Seguindo estas premissas, foi considerado que o material usado na construção permanecerá no local, classificando-o como descarte.

- a) Descarte de concreto. O total de concreto utilizado (**365.412.500 kg**), é colocado como material descartado e inserido com o fluxo da base Ecoinvent “*waste reinforced concrete*”.
- b) Descarte de aço e cobre. O total de **525.737 kg** de aço e cobre (449.336 kg dos equipamentos considerados na construção somados a 76.401 kg de aço e cobre da 4ª turbina, gerador e transformador) utilizados na usina são considerados material descartado. O fluxo da base do Ecoinvent sugerido por Dones, *et al.* (2007) para este tipo de descarte é “*inert waste, for final disposal - RoW*”.

A tabela 5.5 apresenta o resultado do inventário da UHE de Curuá-Una, com as quantidades totais (coluna Total de Insumos) dos insumos incluídos na ACV, considerando o tempo de 100 anos. A coluna Cenário A corresponde a quantidade de cada insumo utilizado para gerar 1 MWh, quando a produção alcança 92,89%, e a coluna Cenário B, corresponde a quantidade de cada insumo utilizado para gerar 1 MWh, quando a produção alcança 70%. A coluna Processo do *Ecoinvent*, refere-se ao processo utilizado para AICV do método *Ecoinvent*, na ferramenta openLCA.

Os dados inventariados e compilados por esta investigação se constituem em um importante registro para que novos trabalhos e pesquisas possam ser realizados sobre a UHE de Curuá-Una.

Tabela 5.5 - Inventário dos insumos incluídos na ACV da UHE de Curuá-Una. Cenário A com produção de 92,89% e cenário B com produção de 70%.

MATERIAL	TOTAL INSUMOS	UNIDADE	CENÁRIO A	CENÁRIO B	UNIDADE	Processo Ecoinvent
<b>CONSTRUÇÃO</b>						
Uso do solo - Transformação para reservatório	1,02E+02	km <sup>2</sup>	3,40E-06	4,61E-06	km <sup>2</sup> /MWh	<i>transformation, to water bodies, artificial</i>
Uso do solo - Transformação para infraestrutura	1,36E-01	km <sup>2</sup>	4,54E-09	6,15E-09	km <sup>2</sup> /MWh	<i>transformation, industrial area, built up</i>
Uso do solo - Ocupação	4,00E+05	km <sup>2</sup> *y	1,33E-02	1,81E-02	km <sup>2</sup> *y/MWh	<i>Occupation, tropical rain forest</i>
Explosivo	5,10E+04	kg	1,70E-03	2,31E-03	kg/MWh	<i>explosive, toxex – RoW</i>
Madeira	4,38E+03	m <sup>3</sup>	1,46E-04	1,98E-04	m <sup>3</sup> /MWh	<i>sawnwood, board, softwood, raw, air dried - RoW</i>
Diesel para gerar eletricidade	4,32E+06	kWh	1,44E-01	1,95E-01	kWh/MWh	<i>diesel – RoW</i>
Aço estrutural	3,44E+07	kg	1,15E+00	1,56E+00	kg/MWh	<i>reinforcing steel, RoW</i>
Concreto	1,46E+05	m <sup>3</sup>	4,88E-03	6,61E-03	m <sup>3</sup> /MWh	<i>concrete, normal – RoW</i>
Projeto asfáltico	5,69E+06	kg	1,90E-01	2,57E-01	kg/MWh	<i>mastic asphalt – RoW</i>
Escavação	1,78E+06	m <sup>3</sup>	5,95E-02	8,06E-02	m <sup>3</sup> /MWh	<i>Excavation, hydraulic digger- RoW</i>
Aço para turbina	7,08E+04	kg	2,36E-03	3,20E-03	kg/MWh	<i>steel, chromium steel 18/8 – RoW</i>
Aço para gerador	9,11E+04	kg	3,04E-03	4,12E-03	kg/MWh	<i>steel, chromium steel 18/8 – RoW</i>
Aço para transformador	5,16E+04	kg	1,72E-03	2,33E-03	kg/MWh	<i>steel, chromium steel 18/8 – RoW</i>
Aço para outros equipamentos	2,20E+05	kg	7,34E-03	9,96E-03	kg/MWh	<i>steel, chromium steel 18/8 – RoW</i>
Total de aço	4,34E+05	kg	1,45E-02	1,96E-02	kg/MWh	<i>steel, chromium steel 18/8 – RoW</i>
Cobre para o gerador	4,79E+03	kg	1,60E-04	2,17E-04	kg/MWh	<i>copper – RoW</i>
Cobre para o transformador	1,09E+04	kg	3,65E-04	4,95E-04	kg/MWh	<i>copper – RoW</i>
Total de cobre	1,57E+04	kg	5,25E-04	7,12E-04	kg/MWh	<i>copper – RoW</i>
<b>OPERAÇÃO</b>						
Óleo de transformador	4,42E+05	kg	1,47E-02	2,00E-02	kg/MWh	<i>lubricating oil – RoW</i>
Fluxo de água	5,77E+11	m <sup>3</sup>	1,93E+04	2,61E+04	m <sup>3</sup> /MWh	<i>Water, turbine use, unspecified natural origin</i>
GLP	6,24E+03	m <sup>3</sup>	2,08E-04	2,82E-04	m <sup>3</sup> /MWh	<i>liquefied petroleum gas - RoW</i>
Gasolina e óleo	2,63E+05	kg	8,76E-03	1,19E-02	kg/MWh	<i>heavy fuel oil - RoW</i>
Diesel	2,75E+06	kg	9,18E-02	1,24E-01	kg/MWh	<i>diesel – RoW</i>
Eletricidade	1,41E+08	kWh	4,70E+00	6,37E+00	kWh/MWh	<i>energy primary, from water power</i>
<b>MANUTENÇÃO/POTENCIALIZAÇÃO</b>						
Aço para 4a. turbina/gerador/transformador	7,12E+04	kg	2,37E-03	3,22E-03		<i>steel, chromium steel 18/8 – RoW</i>
Cobre para 4a. turbina/gerador/transformador	5,25E+03	kg	1,75E-04	2,37E-04		<i>copper – RoW</i>
<b>TRANSPORTE</b>						
Transporte fluvial	1,41E+07	t.km	4,72E-01	6,40E-01	t.km/MWh	<i>transport, freight, inland waterways , barge – RoW</i>
Transporte aéreo	4,05E+06	t.km	1,35E-01	1,83E-01	t.km/MWh	<i>transport, freight, aircraft - RoW</i>
Transporte rodoviário	4,40E+07	t.km	1,47E+00	1,99E+00	t.km/MWh	<i>transport, freight, lorry, unspecified - RoW</i>
<b>DESATIVACÃO</b>						
Total de aço e cobre para descarte	5,26E+05	kg	1,75E-02	2,38E-02	kg/MWh	<i>inert waste for final disposal - RoW</i>
Concreto para descarte	3,65E+08	kg	1,22E+01	1,65E+01	kg/MWh	<i>waste reinforced concrete</i>

### 5.3 ANÁLISE DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA – AICV

Esta é a etapa da ACV que converte todas as entradas/insumos, inventariadas na tabela 5.5, em impactos ambientais seguindo modelos de classificação e caracterização (ISO, 1997). Para esta conversão foi utilizada a ferramenta openLCA 1.4.2, que por sua vez aplica métodos de análise para este processo. Há diferentes métodos que podem ser aplicadas, por exemplo CML 2001, ReCiPe 2008, Eco-Indicator 99, IPCC 2013, TRACI e ILCD (JRC, 2010). Como já mencionado no item 4.3, neste estudo serão utilizados dois métodos o CML 2001 (*midpoint*) e o ReCiPe 2008 (*endpoint*).

Cada método possui suas regras e cálculos para a conversão que são disponibilizados nos seus manuais, tutoriais, documentos, ou seja, se maiores conhecimentos e detalhes sobre os cálculos forem necessário, estes documentos podem ser consultados (GOEDKOOOP *et al.*, 2009b). A figura 5.6 ilustra a implementação dos fluxos do ciclo de vida completo de UHE de Curuá-Una, no software openLCA 1.4, com todos os insumos/inputs sendo incluídos e trazendo consigo seus próprios fluxos, representados pelos retângulos da parte esquerda da figura.

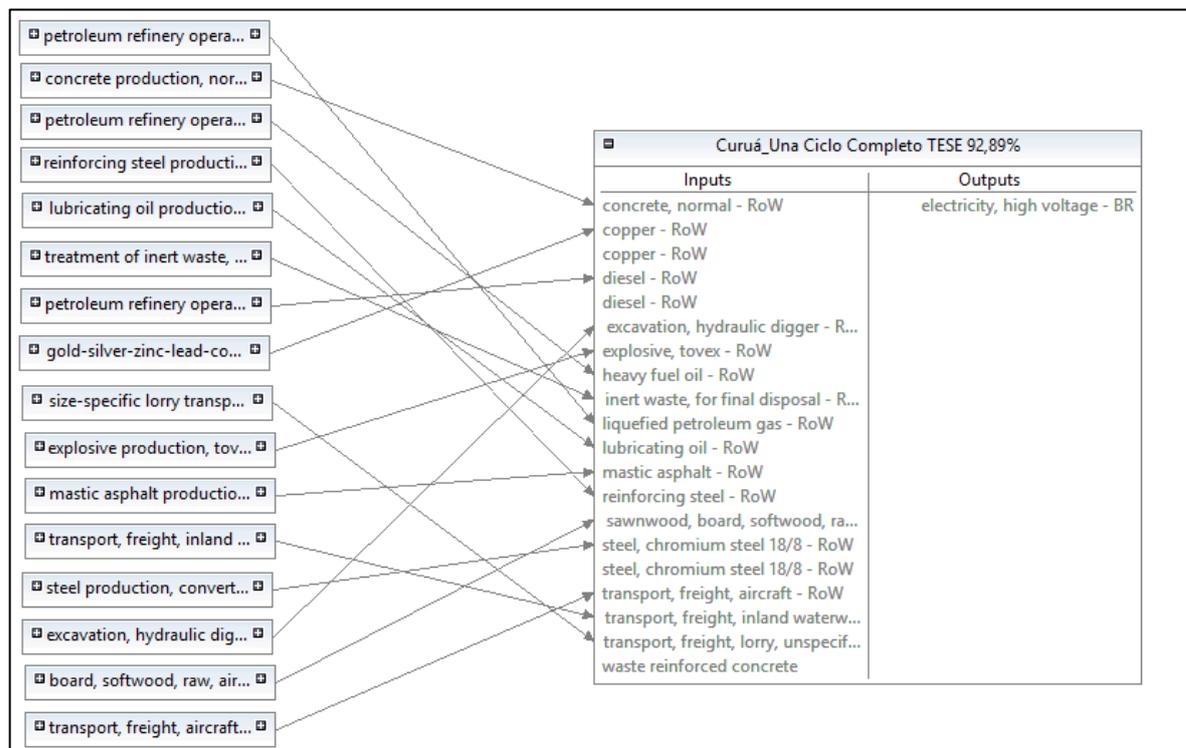


Figura 5.6 – Implementação dos fluxos presentes no Ciclo de Vida da UHE de Curuá-Una, no software openLCA 1.4.2.

As seções 5.3.1 e 5.3.2 apresentam os resultados da análise de impacto para os dois métodos selecionados. Observa-se que os resultados são em relação a 1 MWh para 100 anos de produção. Os valores resultantes para as categorias de impactos selecionadas serão

apresentados para os dois cenários (A e B) já descritos em 4.2.1 e 4.2.2, e seguidos de comentários e gráficos.

### 5.3.1 Análise *midpoint* – CML 2001

O método CML 2001 faz a análise *midpoint* nas categorias: Potencial de Acidificação – *Acidification Potential* (AP), Potencial de Aquecimento Global – *Global Warming Potential* (GWP), Depleção de Recursos Abióticos – *Abiotic Depletion Resources* (ADP), Potencial de Ecotoxicidade da Água Doce – *Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential* (FAETP), Potencial de Toxicidade Humana – *Human Toxicity Potential* (HTP). Estas categorias já foram descritas na seção 4.3.1.

Cenário A - O cenário A corresponde a ACV da UHE de Curuá-Una com 92,89% de capacidade e produção total para 100 anos de 29.796.720 MWh. A tabela 4.5 mostra as diferentes fases da ACV com os impactos respectivos para este cenário. As fases estão representadas nas colunas enquanto que os impactos analisados estão dispostos nas linhas. A coluna Ciclo Completo representa os impactos resultantes do total de insumos, portanto, a soma de todas as fases: Construção, Operação/Manutenção, Transporte e Desativação.

Tabela 5.6 - Análise dos impactos por fases da ACV – Cenário A

Categoria de impacto	Unidade	Ciclo completo	Construção	Operação Manutenção	Transporte	Desativação
Potencial de Acidificação – AP	[kg SO <sub>2</sub> eq]	0,0223	0,0189	0,0009	0,0025	-0,0000
Potencial de Aquecimento Global – GWP 100a	[kg CO <sub>2</sub> eq]	5,4659	4,8922	0,1121	0,4679	-0,0065
Depleção dos recursos abióticos – ADP	[kg antimônio eq]	0,0312	0,0247	0,0033	0,0032	-0,0000
Ecotoxicidade da água doce – FAETP 100a	[kg 1.4-DCB eq]	2,4505	2,2971	0,1169	0,0371	-0,0007
Toxicidade humana – HTP 100a	[kg 1.4-DCB eq]	7,2858	6,4277	0,6267	0,2345	-0,0031

Os resultados da tabela 5.6 mostram que a fase de Construção da UHE de Curuá-Una tem a maior contribuição para os impactos ambientais em todas as categorias analisadas, sobressaindo-se GWP, HTP e FAETP. A tabela 4.6 apresenta o percentual de contribuição de cada categoria de impacto, em cada fase da ACV.

Tabela 5.7 - Percentual de contribuição das categorias de impacto, em cada fase da ACV.

Categoria de Impacto	Operação			
	Construção	Manutenção	Transporte	Desativação
Potencial de Acidificação - AP	84,68%	4,02%	11,18%	0,00%
Potencial de Aquecimento Global - GWP 100 <sup>a</sup>	89,50%	2,05%	8,56%	-0,12%
Depleção dos recursos abióticos - ADP	79,05%	10,56%	10,24%	0,00%
Ecotoxicidade da água doce - FAETP 100a	93,74%	4,77%	1,51%	-0,03%
Toxicidade humana - HTP 100a	88,22%	8,60%	3,22%	0,04%

Para o AP, aproximadamente 85% tem origem na Fase de Construção, sendo que 15% estão relacionados às outras fases. Contribuem para esta categoria principalmente o aço (55,91%) e o concreto (22,51%), utilizados na construção da usina, como apresenta a tabela 5.7.

O GWP tem origem em 89,5% na Fase de Construção, enquanto que nas outras fases este potencial alcança apenas 10,5%. Da mesma forma para a Ecotoxicidade da Água Doce e para Toxicidade Humana que tem origem respectivamente 93,7% e 88,2% na fase de Construção, sendo o restante para as outras fases. A justificativa para este percentual na fase de construção, é por ser esta a fase com maior consumo de matéria prima e energia, bem como impactos mais significativos pelo uso da terra. Toda a matéria prima utilizada contém um ciclo de vida próprio que traz seus próprios impactos, formando uma cadeia acumulativa.

A categoria mais significativa para a Operação e Transporte é Depleção dos Recursos Abióticos, indicando que há influência do uso de combustíveis fósseis utilizados nos transportes de equipamentos via aérea, fluvial e rodoviária, que no caso da UHE de Curuá-Una, percorreram considerável distância até o local da obra, somando-se ao uso de diesel, gasolina e óleo lubrificante para operação da usina. É importante notar que o baixo valor no fator Potencial de Aquecimento Global, na fase de operação pode estar relacionado a falta de dados sobre a emissão de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> da área inundada. Estas emissões podem ser medidas diretamente do reservatório, porém a metodologia utilizada neste trabalho – ACV, não inclui esta análise no processo.

Os resultados negativos na fase de desativação são devido a possibilidade de reciclagem de parte do material, considerada na base de dados do Ecoinvent. Maior investigação relacionada a estes resultados deve ser feita no caso de UHE de Curuá-Una, pois não se tem conhecimento se há possibilidade de reciclagem após a desativação da usina.

A figura 5.7 apresenta um gráfico comparativo entre as 4 fases da ACV, para cada categoria de impacto analisada.

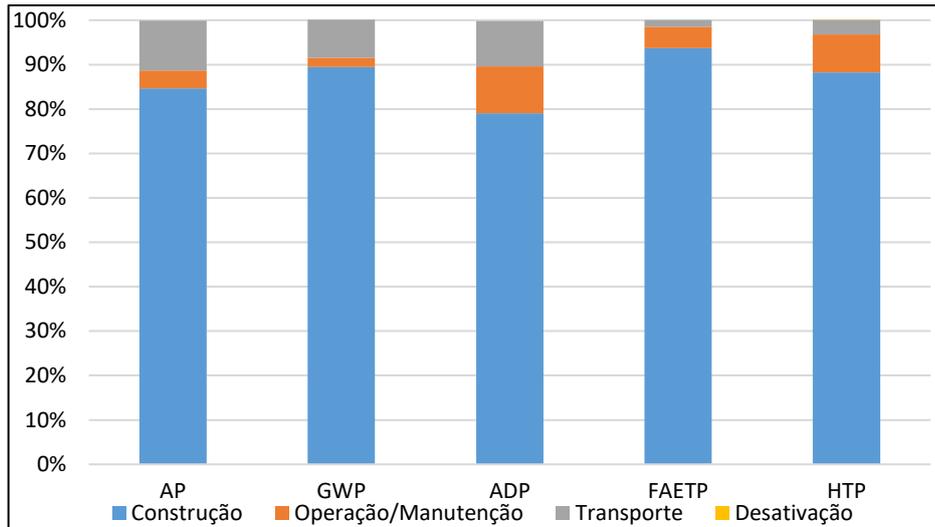


Figura 5.7 - Gráfico comparativo entre as 4 fases da ACV da UHE de Curuá-Una, para cada categoria de impacto.

Os principais insumos responsáveis pelos impactos nas categorias analisadas, podem ser vistos na tabela 4.7.

Tabela 5.8 - Percentual de contribuição dos principais insumos, por categoria de impacto.

	AP	GWP	ADP	FAETP	HTP
Aço	55,91%	53,62%	49,87%	91,25%	92,83%
Concreto	22,51%	33,09%	15,26%	5,57%	2,58%
Transporte	11,40%	8,56%	10,46%	1,52%	3,22%
Petróleo	5,72%	2,48%	19,79%	0,61%	0,62%
Asfalto	1,62%	0,91%	1,89%	0,34%	0,18%
Escavação	1,37%	0,60%	0,71%	0,10%	0,29%
Cobre	0,56%	0,18%	0,24%	0,21%	0,05%

Os resultados da tabela 5.8 mostram que o aço é o principal contribuinte em todas as categorias de impactos analisadas, tendo influência mais acentuada na Ecotoxicidade da Água Doce e Toxicidade Humana. Como primeira justificativa para este resultado, tem-se o próprio ciclo de vida do aço. Segundo Ribeiro (2004), o processo de fabricação do aço produz poluição para a água como óleos, graxas, fenol e ferro e para a atmosfera como CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, FeO. Complementa com dados da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB (1978), que aponta como principais contaminantes neste processo as águas de lavagem e resfriamento do processo de aciaria. Para a categoria GWP – Potencial de Aquecimento Global os impactos têm origem também no aço, porém com significativa quantidade no concreto e no transporte. O AP - Potencial de Acidificação tem como maiores contribuintes o aço, o concreto e o transporte, resultado também encontrado no estudo feito em Vattenfall (2005). Na categoria Depleção de Recursos Abióticos o petróleo figura como segundo maior contribuinte, depois do aço, pela natureza fóssil deste recurso. Um estudo detalhado do ciclo de vida de cada insumo, quantificando as entradas e as saídas/emissões em todos os processos como extração, transporte,

beneficiamento, etc., é necessário para justificar precisamente a sua influência. Não é objetivo desta tese detalhar estes processos.

A figura 5.8 apresenta estes resultados graficamente, com percentual da contribuição de cada insumo para categoria de impacto.

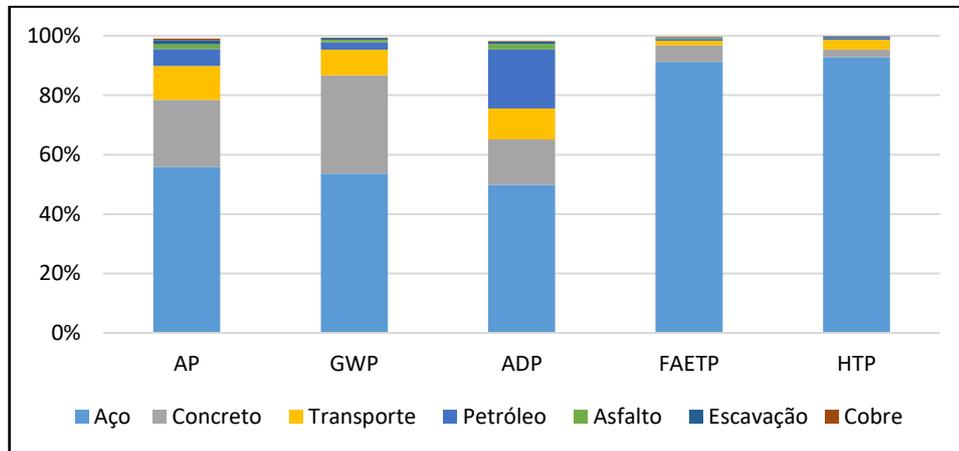


Figura 5.8 - Percentual de contribuição dos insumos para cada categoria de impacto analisada.

- a) Cenário B - O cenário B corresponde a ACV da UHE de Curuá-Una com 70% de capacidade e produção total de 22.110.240 MWh para 100 anos.

O objetivo de realizar o estudo para um cenário alternativo foi representar uma situação de baixa produtividade para a UHE de Curuá-Una, como o ocorrido no ano de 2015 em que um período de escassez de chuvas teve grande influência no nível do reservatório. Conforme dados da planilha IGS - 2015 (ELETRONORTE, 2015), a produção sofreu variação conforme a tabela 5.9. No mês de dezembro de 2015 o nível do reservatório chegou a cota de 61 m, levando ao desligamento de uma das turbinas e diminuindo a potência para 12 MW. Esta foi considerada uma situação crítica e não frequente para a UHE de Curuá-Una.

Tabela 5.9 - Variação no nível do reservatório da UHE de Curuá-Una e influência na potência.

Cota do nível do reservatório (m)	Potência (MW)
68	30,3
67	30
66	28
65	24
64	21
63	18
62	15
61	12

Para o cenário alternativo, considerou-se a potência média de 21 MW, ou seja aproximadamente 70% da potência. A tabela 5.10 mostra as diferentes fases da ACV com os impactos respectivos para este cenário.

Tabela 5.10 - Análise de impacto por fases da ACV – Cenário B

Categoria de impacto	Unidade	Ciclo completo	Construção	Operação Manutenção	Transporte	Desativação
Potencial de Acidificação – AP	[kg SO <sub>2</sub> eq]	0,0303	0,0253	0,0012	0,0034	-0,0000
Potencial de Aquecimento Global – GWP 100a	[kg CO <sub>2</sub> eq]	7,4099	6,6322	0,1522	0,6342	-0,0088
Depleção dos recursos abióticos – ADP	[kg antimônio eq]	0,0423	0,0335	0,0044	0,0044	-0,0001
Ecotoxicidade da água doce – FAETP 100a	[kg 1.4-DCB eq]	3,3241	3,1155	0,1591	0,0504	-0,0009
Toxicidade humana – HTP 100a	[kg 1.4-DCB eq]	9,8841	8,7176	0,8529	0,3178	-0,0042

A comparação dos resultados mostra que a produtividade de uma UHE tem grande influência sobre a grandeza dos impactos causados. Quanto mais produtiva for a UHE ao longo do seu ciclo de vida, menor serão os impactos contabilizados, quanto menor a produção maior serão os impactos como mostram os resultados da comparação dos dois cenários. Em um cenário projetado para diminuição de aproximadamente 27% da produtividade (a produção de 29.796.720 MWh do cenário A em 100 anos, diminui para 22.110.240 MWh no cenário B), os impactos seriam elevados em média 36%, como verifica-se na tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Categorias de Impacto para o Cenário A e Cenário B.

Categoria de Impacto	Unidade	Cenário A	Cenário B
		Ciclo completo 29.976.720 MWh (100 anos)	Ciclo completo 22.110.240 MWh (100 anos)
Potencial de Acidificação – AP	[kg SO <sub>2</sub> eq]	0,0223	0,0303
Potencial de aquecimento Global – GWP 100a	[kg CO <sub>2</sub> eq]	5,4659	7,4099
Depleção de Recursos Abióticos – ADP	[kg antimônio eq]	0,0312	0,0423
Ecotoxicidade da água doce – FAETP	[kg 1.4-DCB eq]	2,4505	3,3241
Toxicidade humana – HTP 100a	[kg 1.4-DCB eq]	7,2858	9,8841

AP aumenta de 0,0223 kg SO<sub>2</sub> eq para 0,0303 kg SO<sub>2</sub> eq, ou seja aproximadamente 36%; GWP de 5,4659 kg CO<sub>2</sub> eq para 7,4099 kg CO<sub>2</sub> eq, representando aumento aproximado de 35%; ADP de 0,0312 kg antimônio eq para 0,0423 kg antimônio eq com percentual de aumento de 36%; FAETP de 2,4505 kg 1.4-DCB eq para 3,3241 kg 1.4-DCB eq, com aumento aproximado de 36% e HTP de 7,2858 kg 1.4-DCB eq para 9,8841 kg 1.4-DCB eq representando percentual de aumento também de 36%.

### 5.3.2 Análise *endpoint* - ReCiPe

Este método, como já descrito em 4.3.2 possibilita a análise *midpoint* e *endpoint* a partir dos parâmetros encontrados na fase de Análise de Inventário. Os resultados na análise *endpoint* são contabilizados em pontos, facilitando o uso para futuros estudos comparativos ou processos de otimização para análise de custos x impactos ambientais.

A tabela 5.12 apresenta os resultados da análise *endpoint* com o método ReCiPe 2008 para o cenário A e a tabela 5.13 para o cenário B.

Tabela 5.12 - Análise *endpoint* para o cenário A.

Categoria de impacto	Unidade	Ciclo completo	Construção	Operação Manutenção	Transporte	Desativação
Qualidade do ecossistema	Pontos	274,118	274,106	0,0028	0,0098	-0,0000
Qualidade da saúde humana	Pontos	0,249	0,224	0,0058	0,0192	-0,0003
Disponibilidade de recursos	Pontos	0,3013	0,253	0,0268	0,0211	-0,0006
TOTAL	Pontos	274,669	274,584	0,0355	0,0502	-0,0009

Tabela 5.13 - Análise *endpoint* para o cenário B.

Categoria de impacto	Unidade	Ciclo completo	Construção	Operação Manutenção	Transporte	Desativação
Qualidade do ecossistema	Pontos	373,048	373,031	0,0038	0,0133	-0,0000
Qualidade da saúde humana	Pontos	0,338	0,304	0,0079	0,0261	-0,0004
Disponibilidade de recursos	Pontos	0,408	0,344	0,0363	0,0287	-0,0008
TOTAL	Pontos	373,795	373,680	0,0481	0,0681	-0,0012

A análise realizada por este método confirma o que foi apresentado no método CML2001: a) a fase de maior contribuição para os impactos ambientais na ACV da UHE de Curuá-Una é a fase de construção; b) quanto maior a produção da UHE, menor são os impactos durante seu ciclo de vida.

## CAPÍTULO 6

### DISCUSSÕES

Este capítulo traz as discussões sobre o tema central do trabalho e seus resultados com base no conhecimento adquirido durante a pesquisa. Pontos importantes serão abordados como, consolidação da interpretação dos resultados em confronto com o que descreve a literatura, tratamento de incertezas, apresentação de ACV's de outras hidrelétricas, ACVs de hidrelétricas comparadas com outras tecnologias de produção de eletricidade e ainda outros fatores importantes a serem considerados como a segurança do serviço de eletricidade e o tamanho dos empreendimentos, resultados da ACV de UHE de Curuá-Una confrontados com outros estudos semelhantes e relato das dificuldades.

#### 6.1 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os impactos contabilizados pela ACV da UHE de Curuá-Una confirmaram o que os autores (DONES *et al.*, 2007; HONDO, 2005; PANG *et al.*, 2015; FLURY e FRISCHKNECHT, 2012); dentre outros, descrevem como características de ciclo de vida de hidrelétricas que são: (i) a fase de construção é a mais crítica em relação aos impactos ocasionados, por todos os insumos necessários para implantação da UHE; (ii) dentre os materiais utilizados como insumos, o aço e o concreto são os maiores contribuintes, devido as suas cadeias de produção; (iii) uma UHE com maior produtividade terá seus impactos diluídos, considerando a relação impacto/produção; (iv) uma UHE tem seus impactos diluídos no seu tempo de vida, pois o padrão considerado para ACV de uma UHE é de 100 anos.

Em relação aos itens (i) e (ii), Pang *et al.* (2015), como já citado, afirmam que o estágio mais influente para os impactos ambientais é a fase de construção e sugerem que para minimizar estes impactos neste estágio é necessário otimizar o projeto estrutural e considerar o uso de novos materiais e de boas práticas de construção. Um estudo sobre as técnicas empregadas na obra da UHE de Curuá-Una, bem como os materiais utilizados, poderia apontar quais os fatores a serem otimizados para a diminuição dos impactos na construção de uma usina do mesmo porte nos dias atuais. Porém, outras áreas de conhecimento seriam necessárias, não sendo objetivo deste trabalho.

Como justificativa para os itens (iii) e (iv), a análise dos cenários A (alta produtividade) e cenário B (baixa produtividade), com tempo de vida de 100 anos para ambos, mostrou que quanto mais alta a produção, menores serão os impactos, podendo-se concluir que uma

alternativa para diminuir os impactos é manter a UHE em condições de assegurar a produção de energia de forma estável, em consequência tornando-se mais ambientalmente viável.

Para projetos que serão ainda implantados, pode-se ressaltar a importância de determinar a capacidade de acordo com a demanda de energia, para que os problemas de instabilidade de produção da usina não aumentem os impactos. Ou seja, o consumo de energia elétrica de um determinado local que é atendido por uma hidrelétrica deve ser equacionado de forma a ser possível planejar a capacidade da usina para garantir a estabilidade do serviço, evitando que ela dependa de usinas de fontes não renováveis, o que mudaria todo o cenário em relação aos impactos ambientais.

## 6.2 TRATAMENTO DE INCERTEZA

Um dos fatores que podem gerar incerteza nos resultados é a quantidade de insumos utilizada, principalmente quando não há registros formais sobre a fase de construção da usina, como no caso da UHE de Curuá-Una. Quando os relatórios apontavam quantidades divergentes, considerou-se sempre o pior caso, ou as maiores quantidades e pesos registrados. Na falta de registros de insumos utilizados na fase de construção da usina, fez-se uma estimativa tomando por base outros inventários, realizando aproximações para adequar a capacidade, tamanho e produção, pois esta é a prática indicada (JRC, 2010).

Pang *et al.*, (2015) tratam a incerteza em relação a quantidade de materiais utilizados na construção, simulando o aumento dos insumos mais influentes na ACV. Foi realizado o mesmo procedimento considerando que o aço e concreto poderiam ter um grau de incerteza de 5%, ou seja, tenham sido utilizados em maior quantidade na proporção de 5%. A tabela 5.1 mostra o resultado da simulação. Uma estimativa aproximada mostra que os resultados variam em 4,1% para GWP; 3,2% para ADP; 4,5% para AP; 4,7% para FAETP e 4,6% para HTP se a incerteza da quantidade de aço e cimento for de 5% a mais. A incerteza devido aos outros materiais tende a ser menor, uma vez que esses materiais contribuem menos para o total de impactos.

Tabela 6.1– Simulação para uso de 5% a mais de aço e concreto na obra.

Categoria de impacto	Total	Total (+ 5%)
GWP (kg CO <sub>2</sub> -eq)	5,465	5,692
ADP (kg Sb- eq)	0,031	0,032
AP (g SO <sub>2</sub> -eq)	0,022	0,023
FAETP (kg DCB-eq)	2,450	2,566
HTP (kg DCB-eq)	7,285	7,623

Outra possibilidade de incerteza nesta análise está associada ao uso dos processos e fluxos da base de dados do Ecoinvent, que muitas vezes não refletem dados especificamente

das regiões tropicais, como por exemplo o ciclo do aço e do concreto, embora os fluxos e processos disponíveis já sejam utilizados por ACVs de todas as regiões do mundo, pois são classificados conforme a localização geográfica, refletindo clima, topografia, logística de distribuição, mercado etc. O procedimento descrito anteriormente também é utilizado para o tratamento deste tipo de incerteza.

Guinée *et al.* (2011) em seu trabalho sobre o crescimento da ACV neste século levantam questões relacionadas a estas incertezas e apontam que bases de dados regionalizadas deverão ser desenvolvidas, novos métodos de análise de impacto serão projetados e métodos para tratamento de incertezas serão melhorados. Desta forma quanto mais trabalhos e pesquisas forem dedicadas às diferentes aplicações da ACV, maior possibilidade de melhorias no processo.

Trabalhos como a ACV da UHE de Curuá-Una têm uma parcela de contribuição neste contexto, por ser a primeira realizada em uma hidrelétrica com estas características. A aplicação da metodologia em um caso real e específico de uma região no baixo Amazonas, para a qual a implantação de diversas hidrelétricas está sendo proposta evidenciou pontos importantes a serem considerados em uma ACV de hidrelétrica, como os citados no capítulo 4, valorizando todo o processo e os resultados.

### 6.3 HIDRELÉTRICA E OUTRAS TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE SOB A ANÁLISE DE ACV

Uma questão bastante presente nas pesquisas é a comparação entre as diferentes fontes de produção de energia para análise da viabilidade ambiental de cada uma. A ACV é uma importante ferramenta para estas análises, devido as suas características e recursos já mencionados em 3.1, em que ao avaliar um produto ou processo, identifica e quantifica energias e materiais em todo o seu ciclo de vida e no ciclo de vida dos insumos para sua implantação. Isto faz com que comparações entre tecnologias de produção de energia diferentes, mesmo sendo de fontes renováveis como a eólica, fotovoltaica, e a hídrica possam ser comparadas de forma mais coerente. Serão apresentadas algumas comparações de ACV de diferentes tecnologias de produção de energia, baseadas em trabalhos na literatura, situando o resultado encontrado por esta pesquisa.

O relatório divulgado por Vattenfall (2012)<sup>26</sup> mostra o resultado de um estudo realizado através de ACV de diversos tipos de usinas produtoras de energia da Vattenfall's Nordic (países nórdicos). Dentre as analisadas estão a energia hidráulica, a eólica, a nuclear, a térmica por biomassa e carvão. O estudo dividiu o processo em quatro estágios: produção e operação do combustível para operação da usina, operação, infraestrutura (construção, manutenção e desativação) e resíduos. Segundo o relatório, Vattenfall gera 82 TWh de eletricidade por ano nos países nórdicos, com 51,9 TWh de energia nuclear; 39 TWh de energia hidráulica; 5,5 TWh de energia de carvão; 2,1 TWh de energia eólica e 1,2 TWh de energia de biomassa e outras de menor importância. Na categoria GWP, as usinas analisadas contabilizam um total de aproximadamente 52 CO<sub>2</sub> eq/MWh.

A tabela 6.2 mostra as principais tecnologias de produção de energia e suas respectivas contribuições segundo o relatório Vattenfall (2012), registrando que a maior quantidade de emissões é gerada pela usina de carvão, o que justifica também as seguintes conclusões das análises: as emissões da fase de construção dominam os impactos ambientais daquelas usinas que não queimam combustível e sim utilizam recursos renováveis como as hidrelétricas, as solares e as eólicas. Para as usinas de combustão (biomassa e carvão) as emissões são maiores na fase de operação. Para as usinas nucleares a maior contribuição é a fase de produção do combustível que é o urânio. O relatório ainda considera que a fase de desativação para todos os tipos de usinas, produzem baixo impacto, devido a possibilidade de reciclagem dos metais e do concreto (VATTENFALL, 2012).

Tabela 6.2 – Contribuição das emissões relativas a diferentes fontes de energia analisada pela Vattenfall, na categoria GWP.

Tipo de usina	Kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Nuclear	2,8
Hidrelétrica	3,3
Carvão	42,9
Eólica	0,3
CHP <sup>27</sup> de turfa	1,3

Fonte: VATTENFALL (2012)

Turconi, Boldrin e Astrup (2013) fizeram uma revisão em 167 trabalhos de ACVs para geração de eletricidade disponíveis na literatura, identificando as emissões de GEEs, apresentadas na tabela 6.3. As fontes incluídas nesta análise são: carvão, linhito<sup>28</sup>, óleo, gás

<sup>26</sup> Vattenfall – Empresa responsável pela produção e distribuição de eletricidade, calor e gás na Europa. Tem como principais mercados os países Nórdicos (Suécia, Finlândia e Dinamarca), Alemanha e Holanda. Produz certificado de Declaração de Produto Ambiental – *Certified Environmental Product Declaration* (EPD) de seus produtos utilizando a metodologia de ACV.

<sup>27</sup> CHP – Combined Heat and Power. Usina produtora de eletricidade e de calor. (HORLOCK, 1996)

<sup>28</sup> Linhito - é uma rocha sedimentar macia, marrom e combustível formada pela compressão de turfa. É considerado um tipo de carvão com baixo poder calórico.

natural, nuclear, biomassa, hidráulica, solar fotovoltaica e eólica. A faixa de valores encontradas para a categoria GWP aponta que a hidrelétrica, a nuclear e a eólica estão dentre as melhores performances ambientais, produzindo menor quantidade de GEEs, enquanto que as usinas a carvão, linhito, gás natural e óleo são as maiores produtoras. A conclusão no trabalho de Turconi, Boldrin e Astrup (2013) confirma o que foi mencionado em Vattenfall (2012): as emissões na fase de operação são mais significativas para aquelas usinas que utilizam fontes de combustíveis fósseis. A produção do combustível utilizado para funcionamento da usina é responsável pela maior quantidade de emissão nas usinas a partir de tecnologias de biomassa e nuclear e para as hidrelétricas, eólicas e solares a emissão maior é na fase de construção. A ACV da UHE de Curuá-Una converge para esta mesma conclusão.

Tabela 6.3 – Faixa de valores para a categoria GWP das diferentes fontes de energia encontradas no estudo de Turconi.

Tipo de usina	Kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Carvão	600 – 1050
Linhito	800 – 1300
Gás natural	380 – 1000
Óleo	530 – 900
Nuclear	3 – 35
Biomassa	8,5 – 130
Hidrelétrica	2 – 20
Solar	13 – 190
Eólica	3 - 41

Fonte: TURCONI, BOLDRIN e ASTRUP (2013)

Gagnon, Bélanger e Uchiyama (2002) apresentam um resumo comparativo do impacto ambiental das diversas fontes de produção de eletricidade, baseando-se em inúmeros trabalhos de ACV. A tabela 6.4 mostra o CO<sub>2</sub> eq/MWh (GEE) e SO<sub>2</sub> eq/MWh (AP) das diversas tecnologias analisadas. Uma questão a se ter atenção nestes resultados é a alta performance ambiental das hidrelétricas a fio d'água, seguidas de outro grupo que inclui a eólica, a solar, a nuclear e a hidrelétrica com reservatório.

Tabela 6.4 – Comparação das emissões pelas diversas fontes de produção de energia segundo o trabalho de Gagnon.

Tipo de usina	(GEE) Kg CO <sub>2</sub> eq/MWh	(AP) Kg SO <sub>2</sub> eq/MWh
Hidrelétrica com reservatório	15	7
Diesel	778	1285
Óleo	778	8013
Hidrelétrica a fio d'água	2	1
Carvão	1050	5274
Nuclear	15	104
Gás natural	443	314
Biomassa	118	26
Eólica	9	69
Solar	13	24

Fonte: GAGNON, BÉLANGER e UCHIYAMA (2002)

Ressalta-se que a análise deve considerar fatores como a quantidade de energia produzida em relação aos impactos causados. A ACV, ao utilizar uma unidade funcional (kg/MWh) como nos trabalhos citados e também por esta tese, contabiliza este fator nas

análises, e possibilita a comparação entre as tecnologias. Isto se deve, principalmente, pela condução dos estudos de ACV que consideram o ciclo de vida dos principais insumos necessários, para que cada tecnologia possa produzir uma certa quantidade de energia. Assim, é possível justificar o fato de que na maior parte dos resultados apresentados anteriormente, a hidrelétrica, mesmo as com reservatório, considerada em alguns estudos de alto impacto, tem quantidade de emissão por MWh comparável as outras renováveis como a eólica ou a solar, quando avaliado as GEEs e ainda menores quando avaliado, por exemplo o potencial de acidificação (AP). O que acontece, é que para produzir uma certa quantidade de energia solar por exemplo, comparável à produzida pela hidrelétrica, é necessária maior quantidade de componentes como placas solares, baterias e inversores. Estes por sua vez utilizam vários insumos como metais e energia para sua fabricação. E assim cresce a cadeia de suprimentos e o seu ciclo de vida contribuindo com diversas categorias de impacto ambiental (PALANOV, 2014 e DESIDERI *et al.*, 2012).

Quantificando esta ideia: a UHE de Curuá-Una gera em um ano o equivalente a 221.102,40 MWh quando avaliado o cenário de menor produção, o que corresponde a 605,76 MWh/dia ( $E/365$ ) ou 6.057.600.000 Wh/dia. Utilizando a fórmula 5.1 descrita em Pinho e Galdino (2014),

$$P_{FV}(W_p) = \frac{(E/TD)}{HSP_{MA}} \quad (5.1)$$

Onde:

$P_{FV}(W_p)$	Potência de pico do sistema FV
$E (Wh/dia)$	Consumo médio anual da edificação ou fração deste
$HSP_{MA} (h)$	Média diária anual das HSP (horas de sol pleno) incidente no plano do painel
$TD (adimensional)$	Taxa de desempenho

Considerando a média diária anual das horas de sol pleno na região norte de aproximadamente 5,5 h/dia (PEREIRA *et al.*, 2006) e a taxa de desempenho de 75%<sup>29</sup>, teremos:

$$P_{FV} = \frac{605.760.000/0,75}{5,5} \quad (5.2)$$

$$P_{FV} = 146.850.909,09 W_p \quad (5.3)$$

---

<sup>29</sup> Conforme Pinho e Galdino (2014), a taxa de desempenho de um sistema pode variar entre 70% a 75%, portanto para os cálculos, considerou-se o melhor desempenho.

Ou seja 146.850.909,09 Wp é a potência de pico total do sistema para gerar a mesma quantidade de energia correspondente a de Curuá- Una. Considerando um módulo (painel) comercial padrão modelo Canada PE320, de potência máxima de pico de 319,68 Wp e área de 1,957 m<sup>2</sup>, serão necessários:

$$N = \frac{146.850.909,09 \text{ (potencia total)}}{319,68 \text{ (potencia do painel)}} = 459.368,45 \text{ paineis} \quad (5.4)$$

Cuja área total corresponde a:

$$Area = 459.368,45 \times 1,957m^2 = 898.984,074 m^2 \quad (5.5)$$

A grande quantidade de módulos fotovoltaicos necessária para produzir a energia correspondente a Curuá-Una seria um ponto restritivo em relação às emissões, se considerarmos todo o seu ciclo de vida, com obtenção dos recursos, transporte, etc., e o custo dos painéis. Este é um ponto que necessita de estudos mais detalhados, utilizando a metodologia de ACV para o sistema FV. Somente com os dados específicos poderia se realizar uma comparação e avaliação da viabilidade ambiental e econômica do sistema.

Avaliar através de ACV o uso de outras fontes de energia, como a fotovoltaica, a eólica, a térmica, dentre outras, para complementar a carga da UHE de Curuá-Una ou para atender as populações que não tem acesso à rede, é um caminho para otimização de um sistema combinado de diversas tecnologias, com o objetivo de produzir energia segura e com menor impacto ambiental. Reforçando a afirmativa, não é possível eleger um sistema de produção de energia como o mais viável ambientalmente sem, contudo, conhecer todas as emissões provocadas pelo seu ciclo de vida.

#### 6.4 HIDRELÉTRICAS DE GRANDE PORTE E ACV DE CURUÁ-UNA

Considerando a escala/tamanho dos projetos, vários estudos (ZHANG *et al.*, 2007; PASCALE, URMEE e MOORE, 2011; RIBEIRO e SILVA, 2010; PANG *et al.*, 2015) argumentam que grandes sistemas têm melhor performance ambiental do que pequenos sistemas, apontando dois motivos: quantidade de MWh produzidos e tempo de vida das usinas. Zhang *et al.*, (2007) avaliaram através de ACV duas hidrelétricas na China, uma com capacidade de 44 MW e a outra 3.600 MW e obtiveram como resultado 44 e 6 kg de CO<sub>2</sub> eq/MWh respectivamente. Quando utilizada a razão impactos por MWh, evidentemente, uma usina que produz mais e com maior tempo de vida, terá seus impactos diluídos por toda sua vida útil. Porém, em algumas circunstâncias uma pequena hidrelétrica ainda será a melhor opção em relação a usinas por combustíveis fósseis, usinas eólicas ou solares, como por

exemplo para servir pequenas populações, para atender comunidades rurais localizadas a grandes distâncias das principais hidrelétricas, ou como complemento de carga de um determinado sistema, como no caso da UHE de Curuá-Una.

Em relação a usinas de grande porte, ainda não é possível comparar o resultado da ACV da UHE de Curuá-Una com outras hidrelétricas como por exemplo a UHE de Tucuruí – PA (8.370 MW), a UHE de Belo Monte – PA (11.223 MW), a UHE de Balbina – AM (275 MW), ou com qualquer outra hidrelétrica de grande porte, situada na região amazônica. Para tal comparação será necessário implementar ACV destes empreendimentos, incluindo todos os insumos utilizados desde a construção, pois somente desta forma é possível avaliar a viabilidade ambiental, considerando o ciclo de vida. Sedimentar o conhecimento em relação a estes grandes projetos é requisito imprescindível para tomadas de decisões futuras.

## 6.5 ALGUMAS VANTAGENS DE HIDRELÉTRICAS COM RESERVATÓRIO

Não é o ponto central das discussões consequentes desta pesquisa, apontar as vantagens de hidrelétricas com reservatório, mas é relevante por se tratar de uma característica da UHE de Curuá-Una e presente e outras da região Amazônica.

Sobre os resultados da tabela 6.4, em que a hidrelétrica a fio d'água tem melhor performance que a hidrelétrica com reservatório, vale ressaltar que, como afirmam os autores Gagnon, Bélanger e Uchiyama (2002), alguns fatores, além da ACV, não estão incluídos neste ranking, e podem ser listados como vantagens a serem consideradas quando as hidrelétricas com reservatório são avaliadas, como: a segurança dos serviços disponibilizados devido a água armazenada no reservatório e a utilização do reservatório para outras atividades.

A segurança dos serviços diz respeito a quão seguro é a produção de energia para o consumidor final, provendo energia de forma intermitente e sem oscilação. Manter o controle da tensão dentro da faixa segura, a regularidade da carga, a capacidade de corrigir desequilíbrios de carga e de voltar a funcionar depois de uma interrupção, são características de um sistema considerado seguro (GAGNON, BÉLANGER e UCHIYAMA, 2002). As diferentes opções de geração de energia, não são capazes de prover igualmente serviço com estas características. Estas características só são possíveis se o sistema tiver condições de armazenar o elemento que gera energia, como no caso das hidrelétricas com reservatório (hidrelétricas a fio d'água dependem do fluxo da água que oscila conforme as estações seca e úmida) ou dos sistemas que utilizam combustível fóssil, que podem armazenar mais facilmente óleo, diesel etc. Dentre os dois sistemas considerados seguros, as hidrelétricas têm melhor performance ambiental, como

já foi apresentado. A energia produzida por sistemas intermitentes, como a energia eólica e a energia solar, podem em alguns casos, quando há diminuição da fonte (vento ou sol), depender de outras fontes de energia (óleo diesel, carvão, etc), para corrigir a flutuação e manter a qualidade do serviço. Isto pode aumentar consideravelmente as emissões do sistema como um todo.

Atualmente grandes reservatórios são planejados e construídos com funções adicionais, como irrigação, controle do fluxo de água, piscicultura, etc. Por exemplo, na China algumas grandes hidrelétricas construídas mais recentemente, como a Hidrelétrica de Três Gargantas, utiliza a água armazenada também para irrigar, facilitar a navegação e controlar o fluxo para disponibilizar água em períodos de estiagem. Além destes propósitos os reservatórios podem ser utilizados para recreação e piscicultura. (FENG *et al.*, 2014; KUMAR *et al.*, 2011). Conforme o dossiê técnico da UHE de Curuá-Una (RAMALHEIRO), alguns projetos de criação de peixes já foram implementados com o objetivo de diminuir a população de macrófitas no reservatório, e como está registrado obteve-se um bom resultado. Porém, atualmente não há registro de uso do reservatório de Curuá-Una para criação de peixes ou outra atividade semelhante.

Sobre esta questão de uma hidrelétrica com reservatório ter múltiplos propósitos é salutar considerar pontos controversos: se tem muitas funções, como produzir eletricidade e ajudar a garantir a disponibilidade de água doce, pode-se definir que os impactos ambientais são de certa forma amenizados, ou seja, diminuiria a razão custo ambiental/benefícios, porém estas múltiplas funções podem reduzir a produção de energia em períodos em que a quantidade de chuvas reduz também o nível do reservatório.

## 6.6 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE OUTRAS ACVs DE UHEs

A comparação entre ACVs de diferentes UHEs deve ser realizada com cuidados criteriosos, pois muitos são os fatores que podem influenciar nos resultados, como já mencionado em 2.2. O objetivo de cada estudo conduz a resultados específicos para melhor interpretação, por isto alguns mostram apenas o fator GWP (HONDO, 2005; SANTOYO-CASTELAZO, GUJBA e AZAPAGIC, 2011), outros apresentam o total de emissão para alguns fatores (BRIZMOHUN, RAMJEAWON e AZAPAGIC, 2015; SUWANIT e GHEEWALA, 2011). Há trabalhos que fazem uma análise de várias ACVs de diferentes autores e tecem argumentos através de comparações como o trabalho de Raadal (2011). O trabalho de PANG *et al.* (2015), a exemplo da presente pesquisa, tem como resultado as categorias de impacto

mais representativos para cada etapa da ACV. A seguir apresenta-se alguns trabalhos cujos autores utilizam estas diferentes formas de utilizar a ACV. Os critérios escolhidos para seleção destes trabalhos com o objetivo de observar as diferenças entre as análises foram: (i) ACV como metodologia utilizada; (ii) hidrelétricas analisadas separadamente de outras fontes; (iii) utilização de uma unidade funcional, kWh<sup>30</sup> ou MWh.

Pang *et al.* (2015) realizaram a ACV de uma pequena hidrelétrica – Guanyinyan, no nordeste da China, a 28°32' de latitude norte e 106°06' de longitude leste, na província de Guizhou, no rio Xishui. O clima desta região é subtropical úmido, com médias de temperaturas variando entre 10° C e 20° C. A hidrelétrica possui 2 turbinas de 1,6 MW cada, que juntas produzem uma média anual de 6,28 GWh. O volume do reservatório é de 1,21E+06 m<sup>3</sup>. A análise foi realizada para um período de 30 anos e como unidade funcional foi utilizado 1 MWh. A tabela 6.5 apresenta o resultado desta análise, que evidencia a fase de construção como maior responsável pelos impactos. Os autores ainda realizaram uma análise de sensibilidade para verificar quais seriam os impactos ao aumentar e diminuir em 10%, o consumo de material como aço, cimento e eletricidade. Os resultados mostraram que, para este caso, a variação no consumo de cimento gera maiores mudanças nos resultados, alcançando  $\pm 6,8\%$ . Uma das conclusões que chegaram foi que para diminuir o nível de emissões em relação à energia gerada, é necessário “otimizar os projetos estruturais, aplicar novos materiais e utilizar melhores práticas de construção” (PANG *et al.*, 2015).

Tabela 6.5 - Resultados obtidos na ACV de Guanyinyan para 1 MWh

Categoria de impacto	Total	Construção	Transporte	Operação e Manutenção	Desativação
GWP (kg CO <sub>2</sub> -eq)	28,4	27,3	0,2	0,9	0,0
ADP (kg Sb- eq)	91,6	86,0	1,2	4,3	0,1
AP (g SO <sub>2</sub> -eq)	109,2	98,5	1,5	9,1	0,0
FAETP (kg DCB-eq)	4,1	3,9	0,0	0,1	0,0
HTP (kg DCB-eq)	11,1	10,9	0,0	0,2	0,0

Fonte: PANG *et al.* (2015).

Brizmohun, Ramjeawon e Azapagic (2015) utilizaram ACV para contabilizar a emissão de GEEs na rede de energia das ilhas Maurício, localizadas na costa da África a 20°10' de latitude sul e 57°31' de longitude leste. O local tem característica de clima tropical quente, com média de temperatura de 24° C a 31° C. Foram incluídas no estudo 4 tipos de fontes: hidráulica, carvão, óleo combustível e bagaço de cana. A energia hidráulica produz somente 4% da energia no local, sendo 40% por combustível fóssil e 37% por usinas de carvão. O restante (19%) é produzido por bagaço de cana. Das oito hidrelétricas analisadas, quatro são com

<sup>30</sup> Quando a unidade funcional é kWh, foi calculada a equivalência nos resultados para unidade MWh.

reservatório, com capacidade de 4; 10; 11,1 e 30 MW respectivamente, somando 55,1 MW; e quatro a fio d'água com capacidade de 0,9; 1; 1,2 e 1,2 MW; somando 4,5 MW. No ano base elas geraram respectivamente 75,6 GWh e 8,2 GWh. A análise foi realizada considerando o tempo de vida de 150 anos para as usinas de reservatório e 80 anos para as usinas a fio d'água. Como não haviam dados primários disponíveis foram utilizados os dados da base do Ecoinvent. Para adequar a proporção dos materiais utilizados e a produção de energia de cada tipo de usina, foi utilizado o método de economia de escala<sup>31</sup>. O resultado deste estudo está na tabela 6.6 e evidencia o que os autores afirmam “carvão e óleo combustível têm os maiores impactos e as hidrelétricas o menor impacto por MWh de eletricidade produzida” (BRIZMOHUN; RAMJEAWON; AZAPAGIC, 2015). Sugerem que para reduzir a emissão de GEEs, as ilhas Maurício devem considerar a diminuição na produção da energia por combustíveis fósseis (carvão e óleo), através do aumento do uso de renováveis, como solar e eólica.

Tabela 6.6 - - Resultados da ACV das hidrelétricas nas ilhas Maurício para 1 MWh, comparadas com as outras fontes de energia.

Categoria de impacto	Hidrelétricas	Bagaço de cana	Óleo combustível	Carvão
GWP (kg CO <sub>2</sub> -eq)	8,6	29	754	1444
ADP (kg Sb- eq)	0008	0,23	5,3	9,99
AP (g SO <sub>2</sub> -eq)	0,01	0,9	29,2	11,1
FAETP (kg DCB-eq)	0,19	2,0	26,7	2,3
HTP (kg DCB-eq)	1,0	14	297	92

Fonte: BRIZMOHUN, RAMJEAWON e AZAPAGIC (2015).

Suwanit e Gheewala (2011) estudaram os impactos causados por 5 mini-hidrelétricas, duas localizadas na região nordeste da Tailândia e três na região norte. O clima da região é tropical úmido com temperatura variando entre 15°C e 35°C. A principal fonte de energia na Tailândia é por combustível fóssil (mais que 90%) e o objetivo do estudo é conhecer os impactos das mini-hidrelétricas para aquela região, por ser uma fonte de energia renovável. Estas mini-hidrelétricas são usinas a fio d'água e tem a capacidade instalada de 5,1 MW, 3 MW, 1,25 MW, 2,25 MW e 1,15 MW respectivamente. O estudo considerou o tempo de vida de 50 anos e unidade funcional 1 MWh. Os resultados para as categorias de impacto analisadas estão representados pela média das 5 mini-hidrelétricas na tabela 6.7 e as conclusões registradas pelos autores apontam que “os principais contribuintes para os impactos são os materiais utilizados na construção como cascalho, areia, cimento, aço, ferro, cobre e a energia utilizada pelos equipamentos” (SUWANIT e GHEEWALA, 2011).

<sup>31</sup> Método de economia de escala - resposta da quantidade produzida a uma variação da quantidade utilizada de todos os fatores de produção (VASCONCELOS e GARCIA, 2006).

Tabela 6.7– Média dos resultados das ACVs de 5 minis hidrelétricas na Tailândia para 1 MWh.

Categoria de impacto	Total
GWP (kg CO <sub>2</sub> -eq)	17,62
ADP (kg Sb- eq)	0,116
AP (g SO <sub>2</sub> -eq)	0,088
FAETP (kg DCB-eq)	6,46
HTP (kg DCB-eq)	32,65

Fonte: SUWANIT e GHEEWALA (2011).

Hondo (2005) fez um estudo sobre as emissões de GEEs através da ACV aplicada a várias tecnologias de produção de energia no Japão, dentre elas a energia hidráulica. A hidrelétrica analisada é do tipo fio d'água, com um pequeno reservatório de 2000 m<sup>3</sup> de volume, vazão máxima de 4,8 m<sup>3</sup>/s, com potência de 10 MW e capacidade de produção de 45%. Foi considerado para esta análise, 30 anos como tempo de vida da usina. O resultado desta análise é apresentado na tabela 6.8, identificando a fase de construção como responsável por 82,8% das emissões. Os autores registram que a maior emissão de CO<sub>2</sub> está associada a produção de aço e concreto para as fundações.

Tabela 6.8 - Resultado da ACV para a hidrelétrica no Japão para 1 MWh.

	kg CO <sub>2</sub> -eq	Participação (%)
Construção	9,3	82,8
Máquinas	0,9	8
Barragens	0,5	4,5
Comportas	4,5	39,8
Outras fundações e construções	3,5	30,6
Operação	1,9	17,2
TOTAL	11,2	100

Fonte: HONDO (2005)

Santoyo-Castelazo, Gujba e Azapagic (2011) apresentam uma comparação entre as diferentes formas de produção de energia no México. Em 2006, ano base da pesquisa, 79% da energia era provida por usinas que utilizam combustível fóssil, 13,5% por hidrelétricas, 4,8% por nucleares, 3% de geotermiais e 0,02% de eólicas. A ACV foi realizada para cada tipo de tecnologia separadamente, utilizando a base de dados do Ecoinvent, adaptada para as condições do México, considerando um tempo de vida de 100 anos. Segundo os autores as hidrelétricas são responsáveis por 12 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh de emissão de GEEs, no México, que junto com outros tipos de usina (eólica, geotermal e nuclear) representam apenas 1,1% das emissões. O trabalho analisou o impacto ambiental total de todas as formas de produção de energia utilizadas e comparou aos impactos de outros países como Itália, Reino Unido e Portugal, identificando menor emissão por MWh de energia produzida para o México.

O trabalho de Raadal *et al.* (2011) faz uma comparação entre as emissões de usinas eólicas e hidrelétricas, baseado em ACVs de relevantes trabalhos publicados. Dentre as hidrelétricas foram incluídas 28 do tipo com reservatório e 11 a fio d'água. Das plantas com

reservatório a variação está entre 0,2 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh a 152 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh de emissão de GEEs. A tabela 6.9 mostra o resultado da pesquisa de Raadal *et al.* (2011), para usinas com reservatório. Os autores ressaltam a diferença de resultados entre os que incluíram as emissões provenientes da área alagada e os estudos que não consideraram este fator. Argumentaram que as pesquisas mostravam dados que poderiam estar equivocados, pois “a maioria destes relatórios considera a emissão bruta do reservatório. E há um consenso que a maioria dos lagos e rios naturais é também fonte de emissão de GEEs, pois retornam para a atmosfera o carbono liberado do curso da água e ecossistemas circundantes” (RAADAL *et al.*, 2011).

Tabela 6.9 - Resultados do estudo de Raadal et al (2011) sobre ACVs de hidrelétricas.

Parâmetros	Reservatório (área inundada incluída)	Reservatório (área inundada não incluída)
Variação de GWP (kg CO <sub>2</sub> -eq)/MWh	4,2 a 152	0,2 a 11,2
Principal etapa da ACV para emissão de GWP	Inundação do reservatório	Infraestrutura
Variação da contribuição da infraestrutura	-----	56% a 99%

Fonte: RAADAL *et al.* (2011)

Os resultados apresentados pelos trabalhos descritos confirmam a necessidade de estudos específicos para cada contexto e para cada objetivo, pois mesmo considerando uma única unidade funcional, como por exemplo, impactos ocasionados por MWh produzidos, as características de cada usina são diferentes e o objetivo do estudo requer adequação da metodologia de ACV.

Em uma rápida análise dos resultados encontrados toma-se como exemplo a categoria GWP, os diferentes trabalhos e as quantidades registradas: Pang *et al.* (2015) - 28,4 kg CO<sub>2</sub>/MWh; Brizmohun, Ramjeawon e Azapagic (2015) - 8,6 kg CO<sub>2</sub>/MWh; Suwanit e Gheewala (2011) - 17,2 kg CO<sub>2</sub>/MWh, Hondo (2005) - 1,2 kg CO<sub>2</sub>/MWh, (Santoyu-Castelazo, Gujba e Azapagic (2011) - 12kg CO<sub>2</sub>/MWh e Raadal *et al.* (2011) um intervalo que varia entre 4,2 e 152 kg CO<sub>2</sub>/MWh. A variação nesta categoria já aponta que as características específicas de cada planta têm importante influência nas emissões, necessitando de estudos criteriosos para cada caso. Justifica-se mais uma vez a ACV da UHE de Curuá-Una, como um estudo importante para somar conhecimento sobre os impactos ambientais deste tipo de geração de energia – hidrelétrica com reservatório na região amazônica.

## 6.7 AVALIANDO OS RESULTADOS DA ACV DA UHE DE CURUÁ-UNA EM RELAÇÃO A OUTROS TRABALHOS

A tabela 6.10 apresenta o resultado da ACV da UHE de Curuá-Una e de outros trabalhos que quantificam a emissão de GEEs para hidrelétricas com reservatório. Embora as

particularidades de cada caso exijam estudos específicos, como já mencionado, resultados muito divergentes podem não trazer confiabilidade à metodologia adotada. O resultado do trabalho aqui implementado, está dentro da faixa de parâmetros ou próximo aos resultados encontrados por outros autores e trabalhos, desta forma podendo assegurar a convergência das metodologias aplicadas.

Tabela 6.10 – Resultados de diversos trabalhos da emissão de GEEs contabilizados por ACVs de hidrelétricas, comparados com a UHE de Curuá-Una.

UHE	Kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Curuá-Una	5,4
GAGNON, BÉLANGER e UCHIYAMA (2002)	15
TURCONI, BOLDRIN e ASTRUP (2013)	11-20
VATTENFALL (2012)	3,3

A discussão sobre o resultado de outras pesquisas reforça a ideia de que não se pode decidir qual das tecnologias é a mais viável para uma determinada situação, se não forem implementados estudos avaliando todas as etapas do ciclo de vida de uma usina, seja ela de qualquer natureza.

Muitas são as discussões sobre a performance ambiental de hidrelétricas, notadamente pelos inúmeros projetos de novas usinas que juntamente com os acordos de diminuição da emissão de GEEs pactuados entre as nações, formam um grande e atual desafio no campo energético. O esforço em abordar algumas destas discussões é apresentado neste capítulo, sem, contudo, ter a pretensão de esgotá-las. Procurou-se discutir alguns dos aspectos importantes que não podem ser negligenciados quando se quer avaliar os impactos ambientais de sistemas de produção de eletricidade como: o método utilizado para avaliação; o tamanho, a capacidade e a produtividade da usina; a comparação com outras fontes energia; características que trazem vantagens ao sistema como a segurança e múltiplos usos. O tratamento de incerteza e a apresentação de resultados de ACV de sistemas semelhantes conferem credibilidade à pesquisa.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentado teve como objetivo implementar a ACV da UHE de Curuá-Una para analisar os impactos ambientais da hidrelétrica através da quantificação de suas emissões. Com a implementação da ACV também foi possível sedimentar o conhecimento sobre a própria metodologia.

A ACV da UHE de Curuá-Una seguiu os padrões da ISO 14040, incluindo as quatro etapas do processo: Definição do Escopo, Análise de Inventário, Análise de Impacto e Interpretação. Porém algumas adequações foram necessárias para que as várias etapas estivessem bem representadas na relação: insumos consumidos/produção de energia/impactos. A dificuldade maior de implementar a ACV da UHE de Curuá-Una foi o inventário da fase de construção, por não haver registros formais de todos os dados desta fase. Para diminuir a possibilidade de equívocos, no caso de falta de dados, seguiu-se os procedimentos utilizados por outros trabalhos e sugeridos pelos manuais de ACV.

A falta de padrões para a elaboração destes inventários e para sua análise, dificultou também o estudo e é apontada por muitos autores. Como recomendações para facilitar e minimizar esta dificuldade registram-se aqui algumas sugestões: elaboração de um framework para análise de incertezas; um padrão para classificar as hidrelétricas em relação ao tamanho, à localização geográfica e ao clima; um padrão de coleta de dados para relacionar os insumos imprescindíveis em uma ACV de hidrelétrica e criação de um vocabulário comum para que profissionais das diferentes áreas possam contribuir para o desenvolvimento da metodologia.

Os resultados da ACV da UHE de Curuá-Una mostram que quando analisado o cenário do período com maior produção, a categoria de impacto que avalia a quantidade de GEEs obteve valor de 5,46 kg CO<sub>2</sub>/MWh e para o cenário do período de menor produção, avaliado por esta pesquisa, foi quantificado 7,40 kg CO<sub>2</sub>/MWh, comprovando que os impactos do ciclo de vida de uma UHE são menores se a energia elétrica produzida for maior, ou seja, maior produção gera menor impacto, podendo apontar esta característica como vantagem em relação a outras tecnologias. A categoria toxicidade humana foi também significativa para análise, sendo bastante influente na fase de construção. Isto se atribui principalmente ao ciclo do aço e do concreto que são utilizados nesta fase. O uso de novas tecnologias, a modernização das práticas de construção, a otimização logística em relação a aquisição de insumos, são alguns dos fatores que poderiam diminuir estes impactos.

O confronto com outros estudos de ACVs de hidrelétricas, utilizando os mesmos métodos mostrou que os resultados se aproximam da faixa de valores divulgados pelos autores indicando coerência com estes estudos. Porém, um estudo mais detalhado de profissionais das áreas afins, como bioquímicos, biólogos, engenheiros, dentre outros, é necessário para justificar muitos dos resultados em relação à contribuição dos insumos em cada categoria de impacto. Assim se poderia relatar, por exemplo, quais as emissões e os resíduos do ciclo do aço ou do concreto e porque produzem muito GEEs, causando tanto impacto nestas categorias e como melhorar o processo para reduzir os danos. E da mesma forma para outros insumos.

A preocupação em levantar discussões sobre os resultados da pesquisa enriqueceu o trabalho. Através da análise destes resultados em relação aos apresentados por outros trabalhos, colocou-se a ACV da UHE de Curuá-Una dentro do contexto deste embate. Assim foi possível:

- a) realizar uma análise de incerteza, utilizando a mesma metodologia divulgada por outros autores;
- b) analisar os resultados encontrados, tendo como parâmetros os resultados de outros trabalhos que utilizaram a mesma metodologia;
- c) confrontar resultados de ACVs de hidrelétricas com ACVs de outras tecnologias de produção de eletricidade e ampliar a compreensão dos principais fatores que devem ser levados em consideração quando da escolha por uma tecnologia;
- d) mostrar a importância de incluir outros aspectos específicos das hidrelétricas quando se pretende definir qual a melhor opção entre as tecnologias. Dentre estes aspectos foram discutidos: a diferença das emissões de hidrelétricas a fio d'água e hidrelétricas com reservatório; a segurança do serviço oferecido; a possibilidade do uso do reservatório para outros fins; a produtividade, o tempo de vida, o tamanho e a capacidade da hidrelétrica.

Com os resultados encontrados, a conclusão é que as hidrelétricas podem ser consideradas fontes de energia viáveis ambientalmente quando avaliadas pelo seu ciclo de vida, chamado de “do berço ao túmulo”. Mesmo emitindo maior quantidade de GEEs, se considerados fatores como produtividade, segurança do serviço e tempo de vida, estes efeitos se diluem.

Alguns fatores que não estavam no escopo deste trabalho são também importantes para tomada de decisão quando se analisa os danos ambientais e sociais em confronto com os benefícios de uma hidrelétrica na região amazônica e assim registra-se recomendações para:

- a) implementação de ACVs de outras opções de fontes renováveis, considerando todos os aspectos regionais como clima, distâncias, custos, produtividade, para que se possa avaliar uma possível combinação destas tecnologias que atendam de forma otimizada a demanda;
- b) implementação de ACV da UTE Santarém para conhecer os impactos ambientais provocados por uma termoelétrica na região;
- c) análise de aspectos sociais que são intrínsecos à grande projetos de hidrelétricas;
- d) análise de impactos ambientais em comparação com os custos para o uso das diversas fontes de eletricidade;
- e) construção de uma base de dados para ACVs em regiões de clima tropical.

A utilização da ACV para análise da cadeia de produção é bastante utilizada em países da Europa que estão avançando na performance ambiental de seus produtos e processos. Na área de energia especificamente já se encontram relatórios com estas análises, inclusive para que as empresas obtenham a Declaração de Produto Ambiental, a ACV é obrigatória. No Brasil ainda são poucos os estudos que utilizam esta metodologia e até o momento, não foi possível localizar trabalhos sobre ACV de hidrelétricas na região amazônica.

O setor de energia, especificamente, a produção de eletricidade, é um dos desafios de todas as nações no mundo, pois o crescimento econômico exige que cada vez mais se produza energia confiável e segura. Por outro lado, as agressões ao meio ambiente provocadas pelas tecnologias de produção de energia e pelo uso de recursos naturais, também estão entre as metas da maioria destes países e devem também ser contabilizadas. Este é o paradoxo que se procura resolver otimizando a performance ambiental do setor energético.

O potencial hidrelétrico atribuído ao Brasil faz com que os problemas advindos deste paradoxo sejam solucionados com o planejamento e implantação de novas hidrelétricas, principalmente na região norte e centro-oeste, onde este potencial é maior. Como exemplo pode-se citar as usinas de Belo Monte – PA; Colíder – MT; Cachoeira Caldeirão – AP; São Manoel – MT e PA; Sinop – MT; São Luiz do Tapajós – PA; Tabajara – PA, Jatobá – PA; Bem Querer – RR; dentre outras.

Várias são as discussões e argumentos sobre a performance ambiental destas grandes hidrelétricas. De um lado pesquisas argumentam que a energia hidráulica é renovável e das mais limpas se comparadas à energia de fontes fósseis, pois tem grande produtividade e longo

tempo de vida. (TURCONI, BOLDRIN e ASTRUP, 2013; VATTENFALL, 2012; GAGNON, BÉLANGER e UCHIYAMA, 2002; BRIZMOHUN, RAMJEAWON e AZAPAGIC, 2015; KUMAR *et al.*, 2011). Por outro lado, pesquisadores indicam que as emissões de GEEs de hidrelétricas em clima tropical, principalmente as com reservatório, se aproximam das usinas que utilizam combustíveis fósseis, e ressaltam ainda as implicações sociais resultantes da implantação de hidrelétricas, escopo que não foi incluído nesta tese (DONES, HECK e HIRSCHBERG, 2003; RAADAL *et al.*, 2011; STEINHURST, KNIGH e; SCHULTZ, 2012; FEARNSIDE., 2005).

Esta controvérsia reforça o que já se mencionou e foi consolidado com esta pesquisa: mais estudos sobre os impactos ambientais e sociais de hidrelétricas, realizados previamente, considerando as especificidades desta tecnologia, devem ser desenvolvidos. E a ACV se apresenta como uma metodologia a contribuir com estes estudos.

Um dos valores de um trabalho de pesquisa como o desenvolvido nesta tese está em despertar para a necessidade de conhecer cada vez mais sobre o tema estudado, ou seja, conhecimento exigindo a produção de mais conhecimento. A sugestão é que trabalhos futuros sejam desenvolvidos incluindo principalmente:

- a) implementação de ACVs de hidrelétricas de grande porte, como as que estão sendo implantadas ou que estão em fase de planejamento na região amazônica. Neste caso, pode-se citar como foco a implementação da ACV da Hidrelétrica de São Luiz do Tapajós – PA;
- b) junção dos métodos, ACV e emissões diretas do reservatório. Porém para análise das emissões diretas, avaliar as emissões das áreas alagadas em comparação com as emissões de áreas intocadas.

A ACV da UHE de Curuá-Una abre um caminho para que outras hidrelétricas sejam estudadas através desta metodologia. A importância desta tese está também relacionada aos acontecimentos atuais que estão sendo motivo de grandes debates sobre a implantação das grandes hidrelétricas na região amazônica. Os resultados obtidos pelas pesquisas exemplificadas aqui, juntamente com os resultados desta tese, colaboram para confirmar que ACV é uma metodologia que deverá ser amplamente utilizada para a análise ambiental de sistemas de produção de eletricidade, porém mais estudos são necessários para consolidar a metodologia. Somente desta forma pode-se ampliar o conhecimento necessário para produzir resultados cada vez mais precisos em relação a ACV de hidrelétricas, colaborando para decidir

se as hidrelétricas são a melhor opção e mais especificamente se implantadas em regiões tropicais são ambientalmente sustentáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRIL, G. *et al.* Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles*, v. 19, n. GB4007, 2005.
- ACERO, A. P.; RODRÍGUEZ, C.; CIROTH, A. LCIA methods–Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. *GreenDelta GmbH, Berlin, Germany*, p. 23, 2014.
- ADÃO, F. X.; HEMERLY, A. C. *Concreto Armado. Novo Milênio: Cálculo Prático e Econômico*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.
- ANEEL. *ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica*. Institucional. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>>. Acesso em: 9 jul. 2016a.
- ANEEL. *ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica*. Institucional. Disponível em: <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em: 11 jul. 2016b.
- ANEEL. *Relatório de Acompanhamento da Implantação de Empreendimentos de Geração*. . [S.l.]: ANEEL, jan. 2016c
- AZAPAGIC, A. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical engineering journal*, v. 73, n. 1, p. 1–21, 1999.
- AZAPAGIC, A.; STICHNOTHE, H. A life cycle approach to measuring sustainability. *Chemistry Today*, v. 27, n. 1, p. 44–46, 2009.
- BARE, J. *et al.* Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts (TRACI). 2012. Disponível em: <[https://iere.org/wp-content/uploads/TRACI-2\\_1\\_User\\_Manual.pdf](https://iere.org/wp-content/uploads/TRACI-2_1_User_Manual.pdf)>. Acesso em: 14 maio 2016.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* *Pavimentação asfáltica : formação básica para engenheiros*. 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS:ABEDA, 2010.
- BRÄNNSTRÖM-NORBERG, B. M. *et al.* *Life Cycle Assessment for Vattenfall's Electricity Generation*. Summary Report. Stockolm, Sweden: Vattenfall AB, 1996.
- BRASIL/MME. *PNE - Plano Nacional de Energia 2030*. Institucional. Brasília: MME/EPE, 2007.
- BRIZMOHUN, R.; RAMJEAWON, T.; AZAPAGIC, A. Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius. *Journal of Cleaner Production*, v. 106, p. 565–575, 2015.
- CIROTH, A. Social LCA/Social Metrics. GreenDelta. Berlin, 2014.
- CIROTH, A., LUNDIE, S., HUPPES, G.. UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, Life Cycle Inventory (LCI), Task Force 3, Methodological Consistency: Inventory methods in LCA: towards consistency and improvement. VDM-Verlag, 2008.
- CONGRESSO NACIONAL. 9648. . LEI Nº 9.648, DE 27 DE MAIO DE 1998, 27 maio 1998.

DE HAES, H. A. U.; HEIJUNGS, R. Life-cycle assessment for energy analysis and management. *Applied Energy*, v. 84, n. 7, p. 817–827, 2007.

DESIDERI, U. et al. Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems. *Applied Energy*, v. 97, p. 930–943, 2012.

DINCER, I.; ROSEN, M. Exergy analysis of cogeneration and district energy systems. *Exergy, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam*, 2013.

DOKA, G. Life cycle inventories of waste treatment services. *Ecoinvent report*, n. n. 13, 2007.

DONES, R. et al. Life cycle inventories of energy systems: results for current systems in Switzerland and other UCTE countries. Final report ecoinvent data v2. 0, v. 5, 2007.

DONES, R.; HECK, T.; HIRSCHBERG, S. Greenhouse Gas Emissions from Energy Systems, Comparison and Overview. *Encyclopaedia of Energy*, v. 3, p. 77–95, 2003.

DUCHEMIN, E *et al.* Comparison of greenhouse gas emissions from an old tropical reservoir with those from other reservoirs worldwide. *Vernh. International \verein. Limnol*, Stuttgart, 2000, p. 1391–1395.

ELETRORBRAS. *Potencial Hidrelétrico Brasileiro, 2015*. Institucional. Disponível em: <[www.eltrobras.com](http://www.eltrobras.com)>. Acesso em: 12 jul. 2016.

ELETRORBRAS. Tipos de pequenas centrais hidrelétricas. *Diretrizes para projetos de PCH*, 2013.

ELETRORBRAS ELETRONORTE. *Parque Gerador*. Institucional. Acesso em: 12 jul. 2016.

ELETRONORTE. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil - Parte II Fontes Renováveis*, nº 3–Energia Hidráulica: Eletronorte, 2013.

ELETRONORTE. *IGS - Inventário Geral Simplificado*. Institucional. Santarém: Eletronorte, 2015.

ENERDATA - INTELLIGENCE + CONSULTING. *Energy Press Release*. Institucional. Paris:. Disponível em: <<http://www.enerdata.net/enerdatauk/press-and-publication/energy-press-releases/2015-world-energy-trends-pr.pdf>>. Acesso em: 31 maio 2016.

*Energy Statistics - Manual*. IEA/OECD, 2005

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2015: ano base 2014*. Institucional. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2015a.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão Energia - 2024*. Brasília: Ministério das Minas e Energia - Secretaria de Energia Elétrica. Departamento de Monitoramento do Sistema Elétrico. Empresa de Pesquisas Energética, 2015b. Disponível em:

<<http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Plano%20Decenal%20de%20Energia%20%E2%80%93%20PDE/MME.aspx?CategoriaID=345>>. Acesso em: 26 jul. 2016.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2016: ano base 2015*. Institucional. Rio de Janeiro: MME/EPE, jun. 2016. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 25 jul. 2016.

FARIA, F. *et al.* Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs. *Environmental Research Letters*, v. 10, 2015.

FAVA, J. A. A Technical Framework for Life-cycle Assessment: Workshop Report: August 18-23, 1990. Smugglers Notch, Vermont, 1990.

FEARNSIDE, P. M. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-Una Dam. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 10, n. 4, p. 675–691, 2005. Acesso em: 11 mar. 2015.

FEARNSIDE, P. M. Hidrelétricas como “Fábricas de Metano” e o Papel dos Reservatórios em Áreas de Floresta Tropical na Emissão de Gases de Efeito Estufa. *Oecologia Brasiliensis*, v. 12, n. 1, p. 100–115, 2008.

FEARNSIDE, P. M. *Hidrelétricas na Amazônia - Impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras*. Manaus: INPA, 2015. v. 1.

FEARNSIDE, P. M. Impacts of Brazil's River Dams: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. *Environmental Science & Policy*, v. 38, p. 164–172, abr. 2014.

FENG, K. *et al.* The energy and water nexus in Chinese electricity production: A hybrid life cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 342–355, 2014.

FERREIRA, J. V. R. Análise de ciclo de vida dos produtos. *Gestão Ambiental*. Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

FINKBEINER, M. Product environmental footprint - breakthrough or breakdown for policy implementation of life cycle assessment? *Int J Life Cycle Assess*, p. 266–271, 2014.

FINNVEDEN, G. *et al.* Recent developments in life cycle assessment. *Journal of environmental management*, v. 91, n. 1, p. 1–21, 2009.

FLURY, K.; FRISCHKNECHT, R. Life cycle inventories of hydroelectric power generation. *ESU-Services, Fair Consulting in Sustainability, commissioned by€ Oko-Institute eV*, p. 1–51, 2012a.

FOOLMAUN, R. K.; RAMJEAWON, T. Life Cycle Assessment (LCA) of PET bottles and comparative LCA of three disposal options in Mauritius. *International Journal of Environment and Waste Management*, 2008, p. 125–138.

FRISCHKNECHT, R. *et al.* Implementation of life cycle impact assessment methods. *Ecoinvent report*, 2007.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.-J.; DOKA, G.; *et al.* *Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1, n° 1*. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

GAGNON, L.; BÉLANGER, C.; UCHIYAMA, Y. Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001. *Energy Policy*, v. 30, p. 1267–1278, 2002.

GALY-LACAUX, C. *et al.* Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 13, n. 2, p. 503–517, 1999.

GARCÍA-VALVERDE, R.; CHERNI, J. A.; URBINA, A. Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications.*, v. 18, n. 7, p. 535–558, 2010.

GOEDKOOPE, M. *et al.* ReCiPe 2008. *A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*, v. 1, 2009.

GUINÉE, J. *et al.* Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*, v. 45, p. 90–96, 2011.

GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R. A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product Life-Cycle Assessment. *Environmental Toxicology Chemistry.*, v. 14, n. 5, p. 917–925, 1995.

GULLIVER, J. S.; ARNDT, R. E. A. *Hydropower Engineering Handbook*. McGraw Hill Inc, 1991.

HONDO, H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Elsevier - Energy*, v. 30, p. 2042–2056, 2005.

HORLOCK, J. H. *Cogeneration-Combined Heat and Power (CHP): Thermodynamics and Economics*. Krieger Pub Co, 1996.

IBGE. *Censo Demográfico 2010*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>>. Acesso em: 19 maio 2016.

IBGE. *Indicadores de desenvolvimento sustentável: Brasil: 2015*. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. (Coleção Ibgeana).

ISO. *Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework*. ISO, 1997

ISO. *Environmental management - Life Cycle Assessment - Goal and Scope definition and inventory analysis*, 1998

ISO. *Environmental management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Impact Assessment*, 2000a

ISO. *Environmental management — Life cycle assessment — Life cycle interpretation*, 2000b.

ISO. *Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines*, 2006

JENSEN, A. A. *et al.* Life cycle assessment (LCA): a guide to approaches, experiences and information sources. European Environmental Agency. n. 6, ago 1997.

JRC. *ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and action steps*. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability. , 2010

KUMAR, A. *et al.* Hydropower. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. NY, USA: Cambridge University Press, 2011.

LALEMAN, R.; ALBRECHT, J.; DEWULF, J. Life cycle analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 1, p. 267–281, 2011.

LEHTINEN, H. *et al.* A review of LCA Methods and Tools and their Suitability for SMEs. *Eco-Innovation Biochem*. Maio 2011.

MATUSZEWSKA, D. Environomic optimal design of geothermal conversion systems using life cycle assessment. 92f. Tese (Doutorado). The School of Renewable Resource Science. Swiss Federal Institute of Technology Lausanne. University of Iceland. Akureyri, 2011.

MEISTERLING, K; SAMARAS, C; SCHWEIZER, V. Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat. *Journal of Cleaner Production*, 2009, p. 222–230.

MME. *Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro*. . [S.l.]: Ministério das Minas e Energia - Secretaria de Energia Elétrica. Departamento de Monitoramento do Sistema Elétrico, 2016

MOREAU, V. *et al.* Modelling the Inventory of Hydropower Plants. *Towards Life Cycle Sustainability Management*. Springer, 2011. p. 443–450.

NBR 14065:20113. *Destilados de petróleo e óleos viscosos. Norma Brasileira*, 2013.

OECD. *G20 Members*. Disponível em: <[www.oecd.org/g20/g20-members.htm](http://www.oecd.org/g20/g20-members.htm)>. Acesso em: 27 jul. 2016.

OECD/IEA. *World Energy Outlook 2013*. World Energy Outlook. França: IEA - Internacional Energy Agency, 2013. Acesso em: 12 jul. 2016.

OGH. SUPERINTENDÊNCIA DE GERAÇÃO HIDRÁULICA. *Ficha Técnica da UHE de Curuá-Una*. Eletrobras/Eletronorte, 2015

OLIVEIRA, S. C. S. *Estudo de viabilidade ambiental de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, com base na ACV*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – UFOPA, Santarém - PA, 2016.

ONS - *Operador Nacional do Sistema Elétrico*. Institucional. Disponível em: <[www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)>. Acesso em: 11 jul. 2016.

PALANOV, N. Life-cycle assessment of Photovoltaic systems: analysis of environmental impact from the production of PV system including solar panels produced by Gaia Solar. TVBH-5074, 2014.

- PANG, M. *et al.* Environmental life cycle assessment of a small hydropower plant in China. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 20, n. 6, p. 796–806, 2015.
- PASCALE, A; URMEE, T; MOORE, A. Life cycle assessment of a community hydroelectric power system in rural Thailand. *Renewable Energy*, 2011, p. 2799–2808.
- PEDREIRO, M. Comunicação Pessoal - Hidrelétrica de Curuá-Una. Santarém - PA, 2015
- PENNINGTON, D. W. *et al.* ILCD Handbook Public Consultation Workshop. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 15, n. 3, p. 231–237, 2010.
- PEREIRA, E. B. *et al.* *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. MCT/INPE, 2006
- PFEIL, W. *Estruturas de Madeira*. [S.l.]: LTC, 1985.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: Grupo de Trabalho de Energia Solar - GTES - CRESESB, 2014.
- QUEIROZ, A; FRANÇA, L; PONTE, M. X. The life cycle assessment of biodiesel from palm oil (“dendê”) in the Amazon. *Biomass and Energy. SciVerse ScienceDirect*, 2012. Bioma and Bioenergy, p. 50–59.
- RAADAL, H. L. *et al.* Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 3417–3422, 2011.
- RAMALHEIRO, A. *Dossiê de Informações Técnicas da Usina Hidrelétrica de Curuá-Una*. Rede Celpa. Superintendência Regional de Santarém.
- REN21. *Renewables 2016 - Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat, 2016.
- RIBEIRO, F. DE M. Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil-Usina de Itaipu: primeira aproximação. Mestrado (Mestre em energia). Universidade de São Paulo. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia - PIPGE/USP. São Paulo, 2004.
- RIBEIRO, F. M; SILVA, A. S. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, 2010. 1, p. 44–54.
- SALA, S. *et al.* Life Cycle Impact Assessment: Research Needs and Challenges from Science to Policy Making. In: 1st World Sustainability Forum, 2011. Publicado por MDPI, Suíça, 2012.
- SALA, S *et al.* Research Needs and Challenges from Science to Decision Support. Lesson Learnt from the Development of the International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Recommendations for Life Cycle Impact Assessment. *Sustainability*, 2012, p. 1412–1425.
- SANTOYO-CASTELAZO, E.; GUJBA, H.; AZAPAGIC, A. Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, v. 36, n. 3, p. 1488–1499, 2011.
- SARÉ, A. R.; LIGOCKI, L. P.; SAYÃO, A. S. *Avaliação de Segurança da Barragem de Curuá-Una com base na Piezometria*. Salvador: 12 out. 2003
- SMITH, H. The cumulative energy requirements of some final products of the chemical industry. In: TRANSACTIONS OF THE WORLD ENERGY CONFERENCE, 1969.

SPIELMANN, M *et al.* Scenario Modelling in Prospective LCA of Transport Systems. Application of Formative Scenario Analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2005, p. 325–335.

STEINHURST, W.; KNIGHT, P.; SCHULTZ, M. *Hydropower Greenhouse Gas Emissions-State of the Research*. EUA: Synapse Energy Economics, Inc., 2012.

STUDART, R. C. S. *Mapa de Localização da UHE de Curuá-Una. Superintendência de Meio Ambiente - Gerência de Estudos e Projetos Ambientais para Sistemas de Geração de Energia Elétrica*, 2006.

SUWANIT, W.; GHEEWALA, S. H. Life cycle assessment of mini-hydropower plants in Thailand. *The international journal of life cycle Assessment*, v. 16, n. 9, p. 849–858, 2011.

TANCREDI, M.; ABBUD, O. A. POR QUE O BRASIL ESTÁ TROCANDO AS HIDRELÉTRICAS E SEUS RESERVATÓRIOS POR ENERGIA MAIS CARA E POLUENTE? *Núcleo de Estudos e Pesquisas do Senado - Textos para discussão*, v. 128, p. 42, 2013.

TSANG, M. P.; SONNEMANN, G. W.; BASSANI, D. M. Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2016.

TURCONI, R.; ASTRUP, T. F. Life Cycle Assessment of Electricity Systems. 2014. Technical University of Denmark, 2014. 80 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Department of Environmental Engineering. Technical University of Denmark. Dinamarca, 2014.

TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. F. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies – overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.

VASCONCELOS, M. A. S.; GARCIA, M. E. *Fundamentos de economia*. São Paulo: Saraiva, 2006.

VATTENFALL. *Vattenfall's electricity generation in the Nordic countries*. , Life Cycle Assessment. Suécia, 2012.

VATTENFALL, A. . *Certified Environmental Product Declaration EPD of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower*. , Environmental Product Declara 8459904. Suécia: Vattenfall AB Nordic Generation, 2005.

VIGON, B. W.; HARRISON, C. L. Life-cycle assessment: Inventory guidelines and principles. United States Environmental Protection Agency. Washington, 1993.

WEIDEMA *et al.* Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*, 2013.

YUE, D; KIM, A; YOU, F. Design of Sustainable Product Systems and Supply Chains with Life Cycle Optimization Based on Functional Unit: General Modeling Framework, Mixed-Integer Nonlinear Programming Algorithms and Case Study on Hydrocarbon Biofuels. *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 2013, p. 1003–1014.

ZHANG, Q. *et al.* Life-Cycle Inventory of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions for Two Hydropower Projects in China. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 13, n. 4, p. 271–279, dez. 2007.

## APÊNDICE A

### RESUMO DA PUBLICAÇÃO: OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO DA GERAÇÃO ENERGÉTICA COM BASE NA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

#### III JORNADA ACADÊMICA DA UFOPA E IV SEMINÁRIO DE PÓS-GRADUAÇÃO Santarém – PA – Brasil - out/2014

##### **Autores:**

Marla Teresinha Barbosa Geller  
Marcos Ximenes Ponte  
Anderson Alvarenga de Moura Meneses

##### **RESUMO**

Planejar a composição e operação da malha energética em nível regional ou nacional requer uma visão holística que considere, senão todos, a maior parte dos processos envolvidos, sejam eles econômicos, sociais ou ambientais. Metodologias que envolvam apenas análises econômicas e financeiras (p. ex. que não abordem Balanço de Energia e Impacto Ambiental) apresentam-se incompletas para a tomada de decisão numa perspectiva atual de economia verde e outras políticas tais como a de redução de emissões. Desta forma, é evidente a complexidade do problema, pois trata-se de um problema de tomada de decisão em uma situação de “compromisso” (*trade-off*), com múltiplos critérios possivelmente conflitantes entre si tais como a maximização de retorno de investimento, a minimização de impactos ambientais e a minimização de custos de operação. Assim, a principal ideia do projeto é determinar combinações ótimas de produções em um conjunto de Plantas/Unidades geradoras de energia (p.ex. termoelétrica fóssil, termoelétrica biocombustível, hidrelétrica, fotovoltaica e eólica) e otimizar simultaneamente diversos critérios tais como Balanço de Energia e Impacto Ambiental, indo além de outros objetivos tais como maximização de investimentos e minimização de custos de operação, de modo que combinações ótimas poderão levar a redução de custos, aumento de receitas e mitigação de impactos ambientais. Critérios como Balanço de Energia e Impacto Ambiental para uma dada planta/unidade de geração de energia podem ser quantificados e mensurados de maneira sistemática e detalhada através da Análise de Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*), definido pela SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) como sendo “um processo objetivo para avaliar os encargos ambientais associados com um produto, processo, ou atividade identificando e quantificando energias e materiais, bem como rejeitos liberados para o ambiente, e avaliar e implementar oportunidades de melhorias

ambientais”. Assim, a fim de possibilitar a tomada de decisão relativa a este problema levando em conta múltiplos critérios, utilizam-se métodos de otimização multicritério para gerar um conjunto de soluções ótimas compondo uma fronteira de Pareto. Os resultados das investigações podem ser aplicados em análises de planejamento, operação e investimento, com base na visão holística proporcionada pela Análise de Ciclo de Vida.

Palavras-chave: Otimização multicritério. Análise de ciclo de vida. Geração de energia.

## APÊNDICE B

### RESUMO DA PUBLICAÇÃO: MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF ELECTRICITY GENERATION IN NORTHERN BRAZIL BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT

SDEWES - 10<sup>th</sup> CONFERENCE ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ENERGY, WATER AND ENVIRONMENT SYSTEMS

Dubrovnik – Croácia – set/2015

#### Autores:

Marla Teresinha Barbosa Geller  
Anderson Alvarenga de Moura Meneses

#### ABSTRACT

One of the main causes of environmental impacts is the electric power sector. Planning the composition and operation of the power grid requires a holistic perspective that considers social, economic as well as environmental processes. It is a decision-making problem in a compromise (trade-off) situation, where conflicting criteria such as environmental impact, production, and cost must be optimized. The objective of this study is the investigation of power generation units based on Life-Cycle Assessment (LCA) in Northern Brazil. To achieve the goals, we present the methodology to be followed, which is composed by the LCA of the Hydroelectric Curuá-Una Plant and thermoelectric generation in the region, as well as the electric power received by the SIN (*Sistema Interligado Nacional*). From these results, we use the multi-objective optimization for obtaining Pareto-optimal solutions for decision-making. This paper presents the methodology to be applied to obtain the optimal solutions and is initial part of the major project.

#### KEYWORDS

Renewable electrical energy. Life Cycle Assessment. Multi-Objective Optimization. Environmental impact. Hydropower. Thermoelectric. Photovoltaic.

## **APÊNDICE C**

### **RESUMO DA PUBLICAÇÃO: LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A SMALL HYDROPOWER PLANT IN THE BRAZILIAN AMAZON**

**IN: JOURNAL OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ENERGY, WATER AND ENVIRONMENT SYSTEMS**

#### **Autores:**

Marla Teresinha Barbosa Geller  
Anderson Alvarenga de Moura Meneses

#### **ABSTRACT**

Brazil as well as the rest of the world, faces a major challenge related to the electricity sector, to meet the growing demand with energy production from renewable sources. Many hydroelectric plants are being implemented, especially in the northern region of Brazil, but its environmental impacts are yet unknown. Energy produced by hydropower plants has been considered totally renewable and clean, but more recent studies describe analysis pointing to the existence of emissions by hydroelectric plants, especially if a lifecycle approach is considered. Thus, the objective of this study is the investigation of environmental impacts of the construction, operation and decommissioning of a hydroelectric power station based on Life-Cycle Assessment. The main focus is the Curuá-Una hydropower plant that is located in the Amazon forest in northern Brazil, in Santarém municipality (Pará state).

#### **KEYWORDS**

Curuá-Una Hydropower Plant. Amazon rainforest. Life Cycle Assessment. Environmental impact.

## APÊNDICE D

### PLANILHA DE CÁLCULO DO TRANSPORTE TERRESTRE, FLUVIAL E AÉREO

	Quant	Peso unitário (t)	Peso total (t)	Rodoviário t.km	Rodoviário t.km (Stm-Curuá-Una)	Fluvial t.km	Aéreo t.km
<b>Equipamentos permanentes</b>							
Turbinas		23,6	70,8	200364	4956	62020,8	
Geradores	3	31,9	95,7	270831	6699	83833,2	
Transformadores	3	20,85	62,55	177016,5	4378,5	54793,8	
Comporta tipo setor	3	12,51	37,53	92036,6955	2627,1	32876,28	
Stop-log de vertedor	3	5,3	15,9	38992,365	1113	13928,4	
Pórtico	1	14,5	14,5	41035	1015	12702	
Comporta tipo vagão	3	11,4	34,2	96786	2394	29959,2	
Central hidráulica	3	0,68	2,04	5773,2	142,8	1787,04	
Pórtico rolante a jusante	1	18,8	18,8	53204	1316	16468,8	
Stop-log de jusante	3	3,61	10,83	30648,9	758,1	9487,08	
Stop-log de montante	3	4,07	12,21	34554,3	854,7	10695,96	
Pórtico rolante da tomada de água	1	9	9	25470	6699	83833,2	
Pórtico rolante da tomada de água	1	21,8	21,8	61694	1526	19096,8	
Ponte rolante da casa de força	1	21,8	21,8	61694	1526	19096,8	
Grupo gerador	1	2,3	2,3	6509	161	2014,8	
Grades de proteção	16	0,62	9,92	24327,312	694,4	8689,92	
Compressores e tubulação para refrigeração		9,3	9,3	26319	651	8146,8	
Total equipamentos			<b>220,13</b>				
<b>Cimento</b>	370000	0,05	18500	41384500	1295000	13671500	
<b>Equipamentos pesados para obra</b>							
Trator D8	6	38,488	230,928	2694,16			578474,64
Trator D6	4	13	51,544	902,02			129117,72
Trator D4	4	8,147	32,588	570,29			81632,94
Patrol	2	13,843	27,686	969,01			69353,43
Rolos Pneumáticos	4	17,273	69,092	1209,11			173075,46
Pé de carneiro	3	11,68	35,04	817,6			87775,2
Arado	4		0	0			0

	Quant	Peso unitário (t)	Peso total (t)	Rodoviário t.km	Rodoviário t.km (Stm-Curuá-Una)	Fluvial t.km	Aéreo t.km
Guincho PH	2	30	60	2100			150300
Caminhões MUNCK	4	40	160	2800			400800
Guincho de coluna	2	45	90	3150			225450
Caçambas	12	30	360	2100			901800
Caminhões	8	30	240	2100			601200
Caminhonetes	6	3	18	210			45090
Caminhões tipo Dumps	8	30	240	2100			601200
<b>TOTAL PARCIAL</b>				<b>42453113,46</b>		<b>14078910,08</b>	
4a. turbina	1	23,6	23,6	66788		20673,6	
4a. gerador	1	31,9	31,9	90277		27944,4	
4o. transformador	1	20,85	20,85	59005,5		18264,6	
<b>TOTAL</b>				42669183,96	1327555,6	<b>14145792,7</b>	<b>4045269,4</b>
<b>TOTAL RODOVIÁRIO</b>					<b>43996739,56</b>		
<b>DISTÂNCIAS</b>							
RODOVIA- São Paulo/ Belém	BALSA - Belém/ Santarém	RODOVIA - Santarém/ Curuá-Una	RODOVIA Venezuela/ Manaus	BALSA Manaus/ Santarém	Rodovia - Rio de Janeiro/Belém	AÉREO São Paulo/ Santarém (Aviões Búfalo)	
2830	876	70	2237	739	2452,35	2505	

## ANEXO A

## FICHA TÉCNICA DA UHE DE CURUÁ-UNA

FICHA TÉCNICA			
<b>IDENTIFICAÇÃO</b>			
Empresa: <b>CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S/A</b>		Nome da Usina: <b>Usina Hidrelétrica do Curuá-Una</b>	
Potência Instalada (MW): <b>30,3</b>		Situação: <b>Em operação</b>	
<b>LOCALIZAÇÃO</b>			
Estado: <b>Pará</b>		Município : <b>Santarém</b>	
Latitude: <b>2°47'22" S</b>		Curso d'água: <b>Rio Curuá Una</b>	
Longitude: <b>54°17'30" W</b>		Sub-Bacia / Código: <b>Região central bacia sedimentar da Amazônia 18. Cod. DNAEE.</b>	
Bacia / Código: <b>Rio Curuá Una / 00254005</b>			
<b>DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS</b>			
<b>VAZÕES CARACTERÍSTICAS</b>			
Vazão Sanitária (m³/s): ---- <b>(Inexistente)</b>		Vazão MLT (m³/s): <b>185</b>	
Período do Histórico Completo: <b>Iniciado em janeiro de 1931</b>		Vazão Firme 95% (m³/s): <b>91</b>	
Área de Drenagem do Barramento (km²): <b>13.600</b>		Vazão Mínima Média Mensal (m³/s): <b>45</b>	
<b>VAZÕES EXTREMAS</b>			
Vazão Máxima de Projeto (m³/s) (10.000 anos): <b>2.000</b>			
Vazão Máxima de Desvio (m³/s) (25/50 anos): <b>2.022</b>			
<b>RESERVATÓRIO</b>			
<b>ÁREAS INUNDADAS</b>		<b>NA S DE MONTANTE</b>	
No NA Máximo Excepcional (km²):		NA Máximo Excepcional (m): <b>68,5</b>	
No NA Máximo Normal (km²): <b>102</b>		NA Máximo Normal (m): <b>68,0</b>	
NA Normal Operativo (m): <b>68,0</b>		No NA Mínimo Normal (km²):	
<b>VOLUMES</b>		NA Mínimo Normal (m): <b>61,0</b>	
No N.A. Máximo Normal (m³): <b>530 x 10<sup>6</sup></b>		<b>NA S DE JUSANTE</b>	
No N.A. Mínimo Normal (m³): <b>130 x 10<sup>6</sup></b>		NA Máximo Excepcional (m): <b>53,0</b>	
Útil (m³): <b>400 x 10<sup>6</sup></b>		NA Máximo Normal (m): <b>49,0</b>	
Abaixo da Soleira Livre do Vertedouro (hm³): <b>inexistente</b>		NA Mínimo Normal (m): <b>45,3</b>	
<b>BARRAGEM PRINCIPAL</b>		<b>CONDUTO FORÇADO (Inexistente em aço) existe tunel de adução</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS: construído em concreto,</b>		<b>CARACTERÍSTICAS</b>	
Diâmetro Interno (m): <b>Seção retangular</b>		Tipo: <b>Terra zoneada com núcleo central impermeável</b>	
Número de Unidades: <b>04 (sendo 03 em operação e 01 a ser montada)</b>		Comprimento Total da Crista (m): <b>600</b>	
Comprimento (m): <b>12 m.</b>		Altura Máxima (m): <b>26</b>	
Base: <b>4,94 m e Altura: 6,224 m por vão (02 vãos por Unidade Geradora)</b>		Cota da Crista (m): <b>71</b>	
<b>VERTEDOURO</b>		<b>TOMADA D' ÁGUA</b>	
<b>COMPORTAS</b>	<b>COMPORTAS</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Tipo: <b>Vertedouro</b>	Tipo: <b>Setor</b>	Tipo: <b>Vagão (2 p/unid geradora)</b>	Tipo: <b>Incorporada à casa de força.</b>
Altura (m): <b>35,0 (sobre as fundações)</b>	Largura (m): <b>10,00</b>	Acionamento: <b>Servomotor</b>	Capacidade (m³/s): <b>2.000</b>
Cota da Soleira (m): <b>57,72</b>	Comprimento Total (m): <b>64,0</b>	<b>de simples efeito</b>	Altura (m): <b>10,26</b>
Stop-Log's: <b>Deslizantes 8 elementos</b>		Largura (m): <b>5,33</b>	Comprimento Total (m): <b>43,20</b>
Altura (m): <b>2,82</b>		Peso : <b>31.530 kg</b> Altura: <b>6.224 mm</b>	
Grade (tomada d'água): <b>Removível</b>		Vão livre : <b>4.940 mm</b>	
<b>CANAL/TUNEL DE ADUÇÃO/DESARENADOR</b>		<b>CASA DE FORÇA</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS: Possui Canal de Adução</b>		<b>CARACTERÍSTICAS</b>	
Comprimento (m): <b>212,50 m</b>	Tipo de Desarenador: <b>a céu aberto</b>		Tipo: <b>Abrigada.</b>
Unidades Geradoras: <b>04 (sendo 03 em operação e 01 a ser montada)</b>		Seção: <b>Trapezoidal</b>	
Bases (m): <b>Menor: 6,00 m e Maior: 62,20 m</b>		Largura (m): <b>48</b>	
Comprimento (m): <b>96</b>		Altura (m): <b>14,0 m</b>	
<b>CÂMARA DE EQUILÍBRIO</b>		<b>GERADOR</b>	
Potência Nominal Unitária (MVA): <b>G1 = G2 = 12,5 G3 = 10,84</b>		<b>CARACTERÍSTICAS (Inexistente)</b>	
Tensão Nominal (KV): <b>6,9</b>		Comprimento (m): <b>16,735</b>	
Peso por gerador: <b>31.952 kg</b> (inclusos gerador, eixo, bloco de scora e mancais e radiadores)		Diâmetro : <b>12"</b>	
Rotação Nominal (rpm): <b>200</b>			
Fator de Potência: <b>G1 = G2 = 0,80 G3 = 0,95</b>			
Rendimento Máximo (%): <b>G1 = G-2 = 96,90% G3 = 97,42%</b>			
<b>TURBINAS</b>		<b>INSTALAÇÕES DE TRANSMISSÃO</b>	
<b>LINHAS DE TRANSMISSÃO</b>		<b>SUBESTAÇÃO</b>	Tipo: <b>Kaplan do eixo vertical.</b>
Extensão (Km): <b>68,8</b>		Tipo: <b>Elevadora</b>	Quantidade: <b>3 unidades.</b>
Tensão (KV): <b>138</b>		Capacidade (KVA):	Potência Nominal Unitária (MW): <b>3 x 10,3</b>
Trafos <b>G1 e G2 = 12500/14000KVA</b>		Vazão Nominal Unitária (m³/s): <b>52,0</b>	Circuito (Simples/duplo): <b>Simples</b>

<b>G3=12500 KVA</b>	<b>Rotação Síncrona (rpm): 200</b>
Rendimento Máximo(%): <b>92.89% na queda de 21,7m (rendimento medio ponderado)</b>	Tensão (KV): <b>6,9/138</b>
Peso por unidade: <b>23.600 kg</b> (inclusos eixo, rotor e mancais) sem óleo	Carga de óleo por trafo: 8.700 litros
Peso de cada trafo: 29.550 kg com óleo	Carga de óleo unidades 1 e 2 = 3.600 litro por unidade - Óleo mineral REGAL 68
<b>PONTO DE CONEXÃO</b>	unidade3 = 4.460 litros - óleo mineral REGAL 68
Local: <b>UHE Curuá-Una</b>	
<b>ESTUDOS ENERGÉTICOS</b>	
Potência da Usina (MW): <b>30,3</b>	Concessionária: <b>CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S/A</b>
Energia Firme (MW): <b>15,2</b>	