



Vanessa Cardoso de Albuquerque

**Avaliação do ciclo de vida espaço-temporal de sistemas de
geração de energia hidrelétrica**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Metrologia pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

Orientador: Rodrigo Flora Calili
Co-orientadora: Maria Fatima Ludovico de Almeida

Rio de Janeiro
maio de 2024



Vanessa Cardoso de Albuquerque

**Avaliação do ciclo de vida espaço-temporal de sistemas
de geração de energia hidrelétrica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Rodrigo Flora Calili

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof^a Maria Fatima Ludovico de Almeida

Co-orientadora

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Rafael Kelman

PSR Soluções e Consultoria em Energia

Prof. Florian Alain Yannick Pradelle

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 02 de maio de 2024

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem autorização da universidade, da autora e de seus orientadores.

Vanessa Cardoso de Albuquerque

Graduada em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2019), nas ênfases de Sistemas de Energia Elétrica e Telecomunicações. Como mestranda do Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio, participou do Programa PRINT - Programa Institucional de Internacionalização, da CAPES, atuando como pesquisadora visitante na UNU-Flores, em Dresden, Alemanha.

Ficha Catalográfica

Albuquerque, Vanessa Cardoso de

Avaliação do ciclo de vida espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica / Vanessa Cardoso de Albuquerque; orientador: Rodrigo Flora Calili; coorientadora: Maria Fatima Ludovico de Almeida. – 2024.

186 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2024.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação – Teses. 3. Metrologia. 4. Avaliação de ciclo de vida. 5. ACV espaço-temporal. 6. Energia hidrelétrica. 7. Usinas hidrelétricas. I. Calili, Rodrigo Flora. II. Almeida, Maria Fatima Ludovico de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. IV. Título.

CDD:389.1

Agradecimentos

Aos meus pais, Eliane Cardoso de Albuquerque e Edinaldo Costa de Albuquerque, que desde cedo me mostraram o valor do estudo, apesar de todas as dificuldades enfrentadas.

Ao meu marido, Leandro Salvador Ferreira, pela compreensão durante os períodos mais difíceis e pelo apoio.

À Anna Carolina de Paula Sermarini, pelo apoio durante todo o curso e fora dele. Sou muito grata pela amizade real que fiz.

Aos meus amigos de sempre e aos recentes, por estarem comigo e acreditarem na minha capacidade mesmo quando eu mesma tinha dúvidas.

Ao meu orientador, Prof. Rodrigo Flora Calili e à minha coorientadora, Prof^a Maria Fatima Ludovico de Almeida, pelo apoio e compreensão durante os anos de mestrado, em especial, durante os últimos meses. Agradeço pelo tempo investido e pela paciência.

Ao coordenador do Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio e aos professores pela dedicação e conhecimentos transmitidos.

À PSR Soluções e Consultoria em Energia, em especial, ao Rodolpho Albuquerque e ao Tarcísio Castro, pelas informações e suporte fornecidos.

Ao Paulo Ragoni, pelo importante apoio e ajuda dada nestes últimos meses de trabalho.

A todos que de alguma forma tornaram o desenvolvimento desta dissertação possível.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

E ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos auxílios concedidos sem aos quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Albuquerque, Vanessa Cardoso de; Calili, Rodrigo Flora (Orientador); Almeida, Maria Fatima Ludovico de (Co-orientadora). **Avaliação do ciclo de vida espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica.** Rio de Janeiro, 2024. 186 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Considerando a importância estratégica dos sistemas de geração de energia hidrelétrica na matriz energética do Brasil, o objetivo desta dissertação é propor e aplicar um modelo de avaliação do ciclo de vida (ACV) espaço-temporal desses sistemas. A metodologia compreende: (i) pesquisa bibliográfica e documental sobre os temas centrais da pesquisa; (ii) desenvolvimento do modelo conceitual de avaliação do ciclo de vida espaço-temporal de sistemas hidrelétricos de geração de energia; (iii) estudo empírico referente à aplicação do modelo proposto na Usina Hidrelétrica Sinop, localizada no estado do Mato Grosso, Brasil. O principal resultado é um modelo de ACV espaço-temporal, validado empiricamente por sua aplicação na referida usina hidrelétrica. Ao integrar parâmetros temporais e espaciais em um novo *framework* de ACV para sistemas de geração de energia hidrelétrica no Brasil, a aplicação do modelo proposto fornece uma avaliação mais completa e precisa dos impactos ambientais desses sistemas, contribuindo assim para o desenvolvimento de políticas e estratégias mais sustentáveis no setor energético brasileiro. Poderá auxiliar nos processos de tomada de decisão relacionados a novos empreendimentos de geração de energia hidrelétrica, incluindo a definição de metas para minimizar danos ambientais e à saúde humana durante a implantação e operação desses empreendimentos. Ao fornecer novas informações de inventário do ciclo de vida de sistemas de energia hidrelétrica, esta dissertação também contribuirá para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil).

Palavras-chave

Metrologia; avaliação de ciclo de vida; ACV espaço-temporal; energia hidrelétrica; usinas hidrelétricas, Brasil.

Abstract

Albuquerque, Vanessa Cardoso de; Calili, Rodrigo Flora (Advisor); Almeida, Maria Fatima Ludovico de (Co-advisor). **Spatio-temporal Life Cycle Assessment of Hydroelectric Power Generation Systems**. Rio de Janeiro, 2024. 186 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Considering the strategic importance of hydroelectric power generation systems in Brazil's energy matrix, the objective of this dissertation is to propose and apply a space-time life cycle assessment (LCA) model for these systems. The methodology comprises (i) bibliographic and documentary research on the central themes of the research, (ii) development of a conceptual model for the spatiotemporal LCA of hydroelectric power generation systems, and (iii) an empirical study focusing on the application of the proposed model in the Sinop Hydroelectric Power Plant, located in the state of Mato Grosso, Brazil. The main result is a spatial-temporal LCA model that was empirically validated by its application in the referred hydroelectric power plant. By integrating temporal and spatial parameters into a new LCA framework for hydroelectric power generation systems in Brazil, the proposed model provides a more comprehensive and accurate assessment of the environmental impacts of these systems, thus contributing to the development of more sustainable policies and strategies in the Brazilian energy sector. This may assist in decision-making processes related to new hydroelectric power generation projects, including the definition of goals to minimize environmental and human health damage during the implementation and operation of these projects. By providing new life cycle inventory information for hydroelectric power systems, this dissertation will also contribute to the National Life Cycle Inventory Database (SICV Brazil).

Keywords

Metrology; life cycle assessment; spatiotemporal LCA; hydroelectric energy; hydropower plants, Brazil.

Sumário

1. Introdução.....	13
1.1 Definição do problema de pesquisa.....	16
1.2 Objetivos: geral e específicos.....	17
1.3 Metodologia.....	17
1.3.1 Fase exploratória e descritiva.....	19
1.3.2 Fase de pesquisa aplicada.....	19
1.3.3 Fase conclusivo-propositiva.....	21
1.4 Estrutura da dissertação.....	21
 2. Avaliação de ciclo de vida: revisão da literatura e análise documental.....	22
2.1 Evolução da produção científica sobre avaliação de ciclo de vida.....	22
2.2 Avaliação de ciclo de vida: referencial normativo.....	24
2.2.1 Definição do objetivo e escopo.....	26
2.2.2 Análise de inventário do ciclo de vida.....	26
2.2.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida.....	28
2.2.4 Interpretação do ciclo de vida.....	30
2.3 Estudos de ACV espacial.....	30
2.4 Estudos de ACV temporal.....	34
2.5 Estudos de ACV espaço-temporal.....	41
2.6 Estudos de ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica.....	44
 3. Identificação e análise de bases de dados e ferramentas computacionais de ACV.....	57
3.1 Base de dados ecoinvent v3.10.....	57
3.2 Ferramentas para a modelagem da ACV espaço-temporal	59
3.3 Métodos de avaliação do impacto do ciclo de vida.....	61
 4. Modelo de avaliação de ciclo de vida espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica.....	66
4.1 Visão geral do modelo.....	66
4.2 Visão detalhada do modelo.....	67
4.2.1 Fase 1: Definição de objetivo e escopo.....	67
4.2.1.1 Objetivo da ACV espaço-temporal.....	69
4.2.1.2 Escopo da ACV espaço-temporal	69
4.2.2 Fase 2: Análise de inventário de ciclo de vida (ICV) espaço-temporal.....	94
4.2.3 Fase 3: Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV).....	99
4.2.4 Fase 4: Interpretação do ciclo de vida.....	101
4.3 Considerações finais sobre o capítulo.....	102

5. Aplicação do modelo conceitual de ACV espaço-temporal na Usina Hidrelétrica Sinop.....	104
5.1 Descrição do sistema hidrelétrico de geração de energia.....	104
5.2 Proposições do estudo empírico.....	106
5.3 Aplicação do modelo de ACV convencional à UHE.....	106
5.3.1 Definição de objetivo e escopo.....	106
5.3.2 Análise de inventário de ciclo de vida.....	109
5.3.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida.....	120
5.3.4 Interpretação do ciclo de vida.....	124
5.4 Aplicação do modelo de ACV espaço-temporal à UHE.....	129
5.4.1 Definição de objetivo e escopo.....	130
5.4.2 Análise de inventário de ciclo de vida.....	130
5.4.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida.....	139
5.4.4 Interpretação do ciclo de vida.....	144
5.5 Discussão dos resultados.....	148
6. Conclusões.....	152
7. Referências bibliográficas.....	157
Apêndice A1 - Fluxos elementares – Nomenclatura ecoinvent.....	172
Apêndice A2 - Definição das categorias de impacto (<i>midpoint</i>).....	174
Apêndice A3 - Mapas com a localização dos impactos nas áreas de proteção (endpoints) a partir do ano 2.....	178
Apêndice A4 - Diagrama de Sankey para a cadeia de suprimentos do cimento, com ênfase na produção do coque de petróleo considerando CN e RoW.....	184

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de ciclo de vida
ACVC	Avaliação de ciclo de vida consequencial
AICV	Avaliação de impacto de ciclo de vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AoP	Área de proteção
CN	China
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FC	Fatores de caracterização
ICV	Inventário de ciclo de vida
ISO	Organização Internacional de Normalização
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PósMQI	Programa de Pós-graduação em Metrologia
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RoW	<i>Rest-of-World</i>
S	Sistema de processo
SEB	Setor elétrico brasileiro
SETAC	Society for Environmental Toxicology and Chemistry
SIN	Sistema Interligado Nacional
U	Unidade de processo
UF	Unidade funcional
UHE	Usinas hidrelétricas com reservatórios
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
UPRs	Processos unitários individuais

Lista de figuras

Figura 1.1 –	Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos.....	18
Figura 1.2 –	Mapa conceitual da pesquisa.....	20
Figura 2.1 –	Evolução da produção científica sobre ACV temporal, espacial e espaço-temporal: 2000-2023.....	22
Figura 2.2 –	Estrutura da ACV segundo a Norma ABNT NBR ISO 14040:2009.....	25
Figura 2.3 -	Fluxograma do processo de uma análise de inventário.....	27
Figura 2.4 -	Representação de fluxos e processos elementares.....	28
Figura 2.5 -	Conceitos de impactos de categorias.....	29
Figura 4.1 -	Visão geral do modelo de ACV espaço-temporal de sistemas de geração hidrelétrica.....	67
Figura 4.2 -	Fluxo de referência genérico para sistemas hidrelétricos de geração de energia.....	72
Figura 4.3 -	Estrutura básica de rede de um produto e seus processos elementares relacionados.....	95
Figura 5.1 -	Localização da UHE Sinop.....	105
Figura 5.2 -	UHE Sinop.....	105
Figura 5.3 -	Fluxo de referência da UHE Sinop.....	108
Figura 5.4 -	Impacto nos pontos intermediários (<i>midpoints</i>) – 10 mais relevantes.....	126
Figura 5.5 -	Impacto nos pontos finais (<i>endpoints</i>).....	129
Figura 5.6 -	Locais impactados para a área de proteção “Ecossistema” no ano 1.....	143
Figura 5.7 -	Locais impactados para a área de proteção “Saúde Humana” no ano 1.....	143
Figura 5.8 -	Locais impactados para a área de proteção “Recursos Naturais” no ano 1.....	143
Figura 5.9 -	Impacto nos pontos finais (<i>endpoints</i>) – ano 1.....	145
Figura 5.10 -	Cadeia de suprimentos do concreto (parcial).....	122
Figura 5.11 -	Locais impactados para a área de proteção “Ecossistema” no ano 1 (produção do coque alterado de CN para RoW)....	148

Lista de quadros

Quadro 2.1 – Estudos empíricos sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica.....	46
Quadro 2.2 – Resultados dos estudos referentes à avaliação dos impactos do ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica.....	52
Quadro 3.1 – Principais características dos <i>softwares</i> de modelagem adotados em estudos de ACV.....	60
Quadro 3.2 – Principais características dos métodos de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV).....	62
Quadro 4.1 – Principais componentes de uma usina hidrelétrica com reservatório.....	70
Quadro 4.2 – Fronteiras espaciais e temporais de usinas hidrelétricas com reservatório por fase do ciclo de vida.....	76
Quadro 4.3 – Categorias de impacto nos pontos intermediários definidas no método ReCiPe 2016 e respectivas características.....	82
Quadro 4.4 – Caminhos para quantificação de danos ambientais segundo o método ReCiPe 2016.....	90
Quadro 4.5 – Tipos e fontes de dados para estudos de ACV espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica.....	92
Quadro 4.6 – Cálculo das saídas dos processos elementares em cada fase do ciclo de vida de usina hidrelétrica com reservatório.....	98
Quadro 5.1 – Processos mais impactantes por ano (<i>midpoints</i>).....	145

Lista de tabelas

Tabela 5.1 –	Recursos Materiais – Abordagem Convencional.....	110
Tabela 5.2 –	Emissões no ar – Abordagem Convencional.....	116
Tabela 5.3 –	Emissões no solo – Abordagem Convencional	117
Tabela 5.4 –	Emissões na água – Abordagem Convencional.....	118
Tabela 5.5 –	Resíduos – Abordagem Convencional.....	119
Tabela 5.6 –	Resultado dos impactos ambientais nos pontos intermediários (<i>midpoints</i>).....	121
Tabela 5.7 –	Resultado dos impactos nos pontos finais (<i>endpoints</i>).....	122
Tabela 5.8 –	Percentual de contribuição em cada uma das etapas (<i>midpoint</i>).....	125
Tabela 5.9 –	Recursos Materiais – Abordagem Temporal.....	133
Tabela 5.10 –	Emissões no ar – Abordagem Temporal.....	135
Tabela 5.11 –	Emissões no solo – Abordagem Temporal.....	136
Tabela 5.12 –	Emissões na água – Abordagem Temporal.....	137
Tabela 5.13 –	Resíduos – Abordagem Temporal.....	138
Tabela 5.14 –	Resultado dos impactos ambientais nos pontos intermediários por ano por unidade funcional (UF) (<i>midpoints</i>).....	140
Tabela 5.15 –	Resultado dos impactos ambientais nos pontos finais por ano (<i>endpoints</i>).....	141
Tabela 5.16 –	Locais de maior impacto para a área de proteção ‘Ecossistema’ no ano 1.....	146
Tabela 5.17 –	Locais de maior impacto para a área de proteção ‘Ecossistema’ no ano 1 alterando-se CN para RoW.....	147

1

Introdução

Os sistemas de geração de energia hidrelétrica desempenham um papel estratégico na matriz energética do Brasil, contribuindo significativamente para o suprimento de eletricidade do país. No ano de 2023, representaram 66% da capacidade instalada de geração de eletricidade no país (Brasil, 2024). A importância estratégica da geração de energia hidrelétrica é evidenciada não apenas pela sua contribuição significativa para a capacidade de geração de eletricidade, mas também pelos seus impactos socioeconômicos e ambientais.

Esta forma de energia é altamente relevante devido à abundância de recursos hídricos no território brasileiro, que proporciona uma fonte de energia renovável e economicamente viável. As condições geográficas e geológicas com regiões com grandes rios possibilitaram a implementação de usinas hidrelétricas para suprimento da maior parte do consumo de eletricidade no país. Além disso, as hidrelétricas desempenham um papel fundamental na segurança energética do Brasil, fornecendo uma fonte confiável e estável de eletricidade para atender à crescente demanda por energia no país.

A matriz elétrica brasileira passa hoje por importantes alterações em função da massiva entrada de fontes renováveis intermitentes, ao mesmo tempo em que ocorre a redução da capacidade de regularização das usinas hidrelétricas. Devido ao expressivo parque de geração de energia hidrelétrica já instalado no Brasil, foi possível viabilizar a geração a partir de fontes renováveis que, mesmo se mostrando competitivas, são intermitentes e não despacháveis.

Na perspectiva do planejamento e operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), novos desafios apontam para a necessidade de considerar a dinâmica temporal e espacial associada à expansão da geração de energia renovável, como também propor estratégias de expansão da geração de energia que resultem em um sistema ótimo e flexível o suficiente para acomodar os diferentes cenários de carga e de disponibilidade de geração nos diferentes subsistemas.

Além de considerar os aspectos econômicos, quantificados pelas ferramentas tipicamente adotadas no planejamento energético, é necessário avaliar os impactos ambientais que os sistemas de geração de energia hidrelétrica podem gerar. A construção de barragens para a formação de reservatórios pode resultar em impactos nos ecossistemas aquáticos e terrestres, além de afetar comunidades locais que dependem dos recursos naturais da região. Portanto, é essencial avaliar de forma abrangente e holística os impactos ambientais, sociais e econômicos associados à geração hidrelétrica.

Nesse contexto, a avaliação do ciclo de vida (ACV) surge como uma ferramenta essencial para analisar e quantificar os impactos associados a esses sistemas de geração de energia ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o descomissionamento das usinas.

Inicialmente, a ACV foi desenvolvida segundo uma abordagem global, tendo como pressuposto básico a homogeneidade espacial e temporal do ambiente de análise (Jolliet et al., 2016).

As Normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009 (ABNT/ISO, 2009a, 2009b) apresentam uma estrutura bem definida para estudos de ACV, tendo como pressuposto básico a homogeneidade espacial e temporal do ambiente de análise (Jolliet et al., 2016). A estrutura das referidas Normas contempla quatro fases, a saber: (i) definição do objetivo e escopo; (ii) análise de inventário do ciclo de vida, mediante levantamento dos dados de todas as entradas (materiais, energia e recursos) e saídas (produtos, subprodutos e outras saídas); (iii) avaliação dos impactos ambientais; e (iv) interpretação dos resultados obtidos.

Como um modelo de avaliação estática, considerou-se que o consumo de recursos naturais, os níveis de emissão de gases de efeito estufa, bem como os mecanismos de efeito ambiental, permaneceriam inalterados durante todo o período de avaliação e geralmente poderiam ser agregadas em valores únicos (Owens, 1997; Bare et al., 1999; Reap et al., 2008a, 2008b; Guinee et al., 2011; Jolliet et al., 2016).

No entanto, a aplicação da ACV nos mais diversos contextos com base no pressuposto da homogeneidade espacial e temporal gerou resultados com alto grau de agregação dos impactos potenciais e de incerteza, já que muitos parâmetros da avaliação do ciclo de vida são dependentes de condições espaciais e temporais. A título de ilustração, o consumo de recursos e as emissões ocorrem em momentos

diferentes e a intensidade de emissão de produtos de uma determinada cadeia de suprimento pode mudar devido à difusão de novas tecnologias, dentre outros aspectos. Além disso, alguns modelos de caracterização de determinadas categorias de impacto podem variar em função de aspectos geográficos (Reap et al., 2008a, 2008b; Beloin-Saint-Pierre, 2012; Sharma e Gupta, 2019; Jordaan et al., 2021).

De fato, a inclusão objetiva de considerações espaciais e temporais no enquadramento conceitual da ACV tem sido debatida e confirmada nas últimas duas décadas. A partir da necessidade de se aprimorar as avaliações baseadas em ACV, vários autores passaram a incorporar parâmetros espaciais ou temporais em estudos nos mais diversos setores, destacando-se aqui os poucos estudos de ACV que abordaram conjuntamente parâmetros espaciais e temporais (Beloin-Saint-Pierre et al., 2014; Olkkonen e Syri, 2016; Maier, 2017; Sacchi et al., 2019; Kumar et al., 2019; e Su et al., 2022).

Não obstante os avanços de pesquisa em relação à inclusão conjunta de considerações espaciais e temporais no enquadramento conceitual da ACV, buscou-se identificar na fase exploratória desta pesquisa as abordagens metodológicas de ACV espaço-temporal que estão sendo propostas até o momento e que deverão ser a base para o desenvolvimento do modelo conceitual de avaliação espaço-temporal do ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica no Brasil.

Discussões específicas sobre a relevância dos métodos de caracterização espaço-temporal dos sistemas modelados em estudos de ACV são escassas e pouco elaboradas. Atualmente, a principal restrição à inclusão conjunta de parâmetros espaciais e temporais reside no tempo necessário para proceder a desagregação espacial e temporal dos sistemas. Os resultados da revisão da literatura reportados no capítulo 2 permitiram evidenciar lacunas substanciais no que tange à integração de parâmetros espaciais e temporais à ACV no contexto da geração de energia hidrelétrica.

A aplicação de um modelo de ACV espaço-temporal para sistemas de geração de energia hidrelétrica no Brasil é relevante por várias razões. Primeiramente, o Brasil possui uma grande capacidade instalada de geração de energia hidrelétrica e uma extensa rede de rios, o que torna essa fonte de energia predominante no país. No entanto, a expansão e operação desses empreendimentos podem ter impactos significativos no meio ambiente e nas comunidades locais, tornando essencial uma avaliação abrangente e precisa dos

seus impactos ao longo do tempo e do espaço. Além disso, a utilização de um modelo de ACV espaço-temporal pode fornecer informações valiosas para apoiar a tomada de decisão relacionada a novos empreendimentos de geração de energia hidrelétrica, incluindo a definição de metas para minimizar danos ambientais e à saúde humana durante a implantação e operação desses empreendimentos.

1.1.

Definição do problema de pesquisa

Considerando-se que:

- A matriz elétrica brasileira é baseada na fonte hidrelétrica, em especial em empreendimentos de grande ou médio porte, como as usinas hidrelétricas com reservatórios;
- O desafio do setor elétrico brasileiro (SEB) é manter o equilíbrio entre a demanda, as projeções de crescimento econômico e a expansão da oferta de energia por meio de fontes ambientalmente sustentáveis;
- A ferramenta de avaliação do ciclo de vida (ACV) pode ser empregada para avaliar os impactos ambientais de sistemas de geração de energia em geral e, em particular, de sistemas de geração de energia hidrelétrica;
- Há necessidade de aprimoramento metodológico das avaliações baseadas em ACV convencional, na perspectiva de sejam incluídas em seus escopos variações temporais e espaciais ao longo do ciclo de vida dos sistemas estudados;
- Existem lacunas identificadas na literatura referentes ao tema central desta dissertação, i.e., avaliação do ciclo de vida espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica;

Enunciam-se as seguintes questões norteadoras a serem respondidas ao longo da pesquisa:

- Como a avaliação do ciclo de vida espaço-temporal pode contribuir para o avanço do conhecimento em ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica?
- Quais são os impactos ambientais dos sistemas de geração de energia hidrelétrica, calculados segundo uma modelagem de ACV consequential, que permite antecipar os possíveis estados futuros dos referidos sistemas em diferentes cenários?

1.2.

Objetivos: geral e específicos

Buscando responder as questões norteadoras, esta dissertação tem como objetivo propor e aplicar um modelo de ACV espaço-temporal para sistemas de geração de energia hidrelétrica no Brasil. Para atingir esse objetivo, os seguintes objetivos específicos deverão ser atingidos:

- Realizar uma revisão bibliográfica e documental sobre ACV espacial, temporal e espaço-temporal, incluindo estudos empíricos sobre aplicações em sistemas de geração de energia hidrelétrica, publicados no período de 2010 a 2023;
- Analisar o referencial normativo aplicável, bases de dados e ferramentas computacionais de escolha para a fase de modelagem, incluindo os métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida;
- Desenvolver um modelo conceitual de ACV espaço-temporal para sistemas de energia hidrelétrica, segundo as fases propostas nas Normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009;
- Demonstrar a aplicabilidade do modelo, mediante o desenvolvimento de um estudo empírico realizado na Usina Hidrelétrica Sinop, localizada no estado do Mato Grosso, Brasil;
- Evidenciar os diferenciais do emprego da ACV segundo uma abordagem espaço-temporal em relação ao estado-da-arte de ACV de sistemas de energia hidrelétrica.

1.3.

Metodologia

A Figura 1.1 apresenta o desenho da pesquisa, apresentando esquematicamente seus componentes e métodos, de acordo com três fases principais: (i) exploratória e descritiva; (ii) pesquisa aplicada; e (iii) conclusiva.

Segundo a taxonomia proposta por Vergara (2002), a pesquisa pode ser considerada aplicada, explicativa, descritiva e metodológica (quanto aos fins). Quanto aos meios de investigação, a metodologia compreende: (i) pesquisa bibliográfica e documental sobre ACV espacial, temporal e espaço-temporal; (ii) análise do referencial normativo de ACV, bases de dados e ferramentas computacionais para a modelagem e avaliação de impacto do ciclo de vida; (iii) desenvolvimento de um modelo conceitual de ACV espaço-temporal para sistemas de energia hidrelétrica; e (iv) demonstração da aplicabilidade do modelo, mediante o desenvolvimento de um estudo empírico referente à Usina Hidrelétrica Sinop, localizada no estado do Mato do Grosso, Brasil.

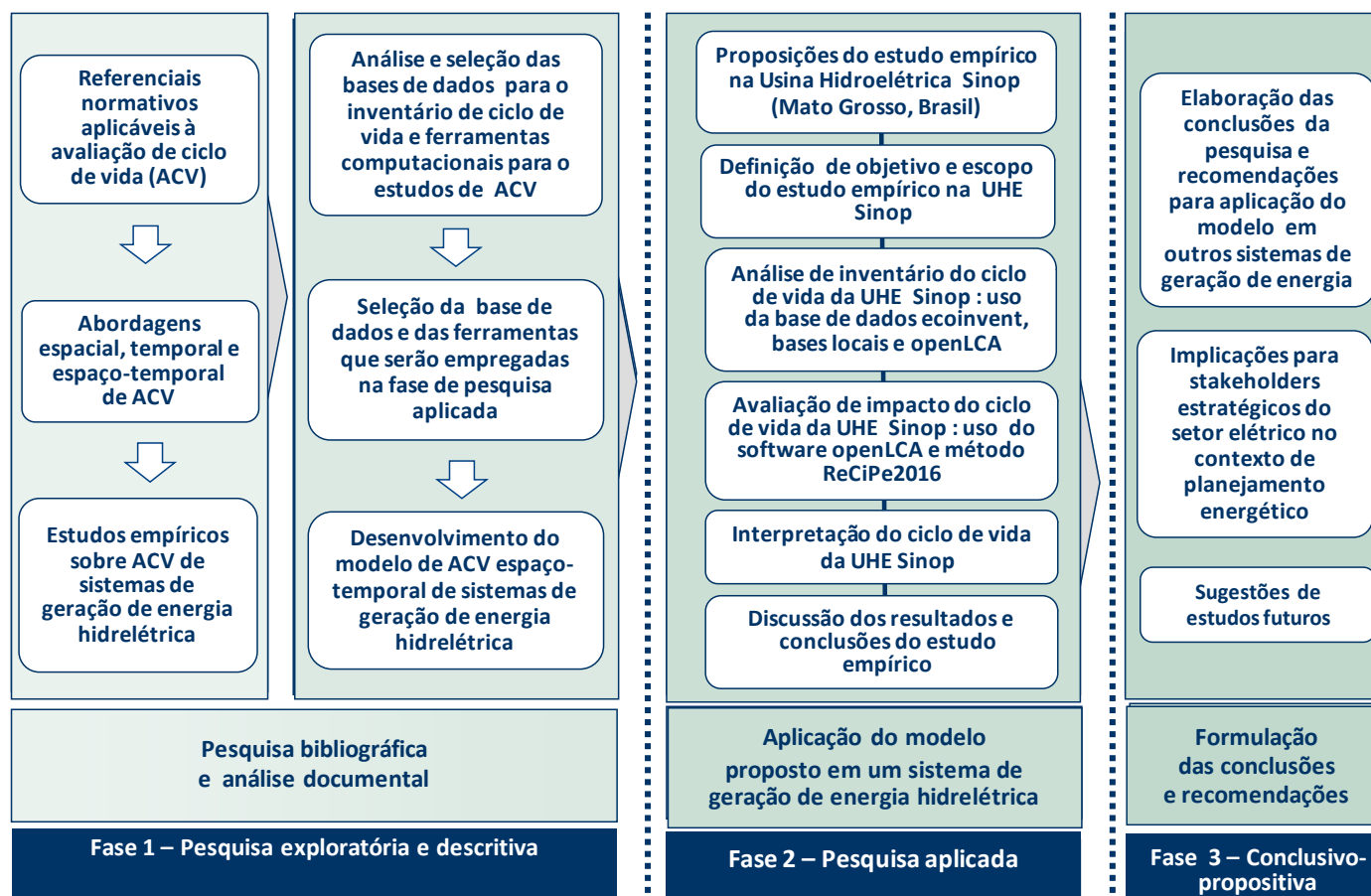


Figura 1.1 – Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos
 Fonte: Elaboração própria.

Detalham-se, a seguir, o desenvolvimento de cada fase e os resultados esperados em cada bloco da Figura 1.1. Destaca-se que o desenho da pesquisa foi desenvolvido em total alinhamento com os objetivos enunciados na seção 1.2 deste capítulo.

1.3.1.

Fase exploratória e descritiva

A fase exploratória e descritiva foi iniciada com pesquisa bibliográfica e documental, com o objetivo de levantar trabalhos conceituais e documentos de referência para delimitação do tema central da pesquisa – avaliação de ciclo de vida de sistemas de geração de energia. Em seguida, aprofundou-se a revisão bibliográfica, buscando identificar estudos empíricos que empregavam parâmetros espaciais e temporais na ACV. Como não há estudos que tratam diretamente do tema abordado nesta dissertação, trabalhos de outras áreas foram considerados na busca bibliográfica. Identificou-se, assim, uma lacuna na literatura sobre o tema proposto, que foi explorada na etapa de pesquisa aplicada.

A análise dos documentos selecionados incluiu o emprego das técnicas *backward* e *forward*, que permitiram explorar as origens e o desenvolvimento dos temas em foco, bem como as contribuições mais recentes e os avanços nas respectivas áreas de estudo.

Apresenta-se na Figura 1.2, adiante, uma visão geral e esquemática dos resultados desta primeira fase. O referencial teórico constituiu uma orientação conceitual para a pesquisa, ao compor o vocabulário especializado e organizar o conhecimento sobre avaliação de ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica.

1.3.2.

Fase de pesquisa aplicada

Desenvolveu-se a fase da pesquisa aplicada propriamente dita, conforme reportado nos capítulos 4 e 5. No capítulo 4, apresenta-se o modelo conceitual de avaliação de ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica segundo uma abordagem espaço-temporal e no capítulo 5, busca-se demonstrar sua aplicabilidade a partir dos resultados de um estudo empírico realizado em uma usina hidrelétrica localizada no Brasil.

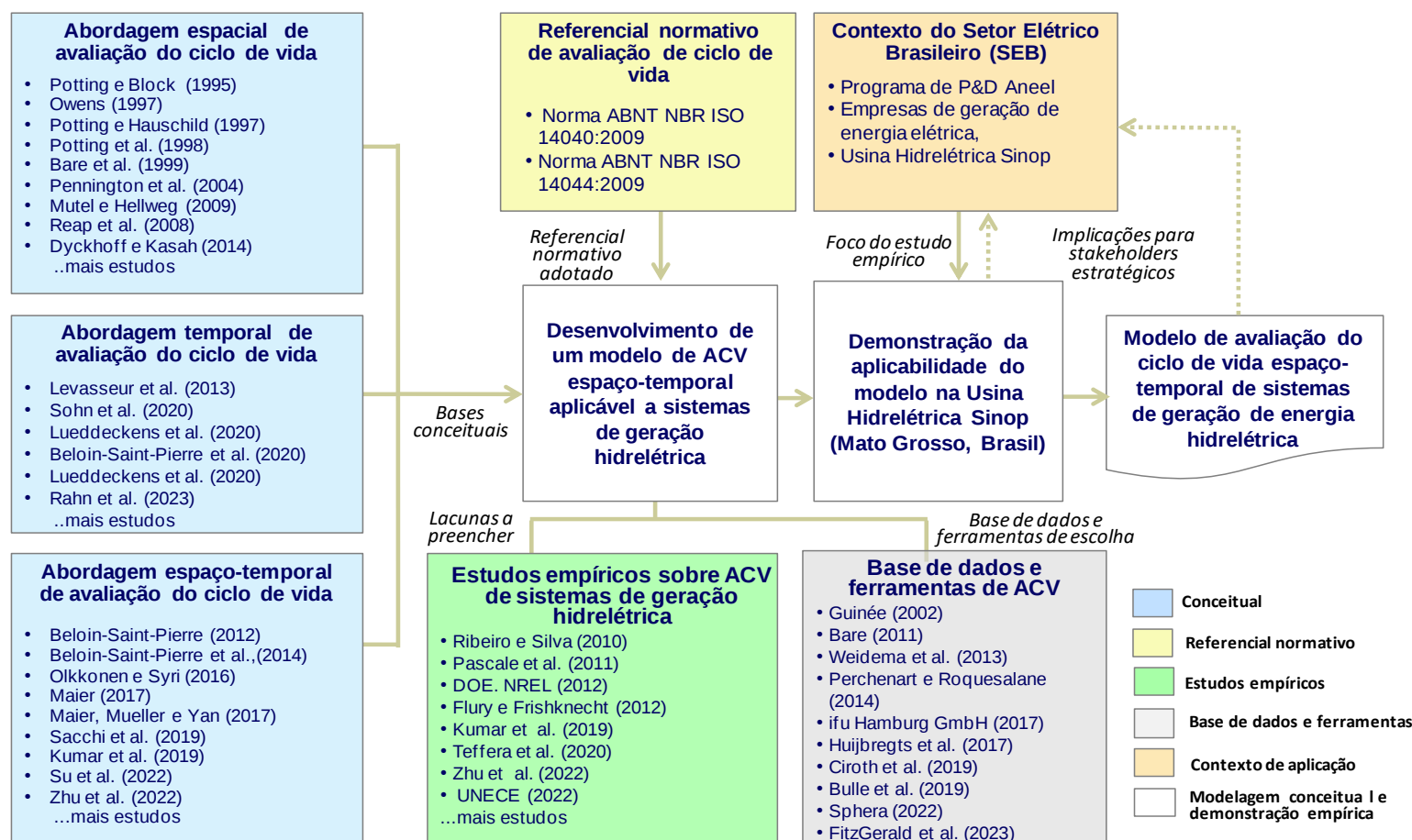


Figura 1.2 – Mapa conceitual da pesquisa
Fonte: Elaboração própria.

1.3.3.

Fase conclusivo-propositiva

Na terceira fase, elaboraram-se as conclusões em relação aos objetivos enunciados na seção 1.2 e formularam-se um conjunto de recomendações aos diversos atores interessados na aplicação do modelo de avaliação de ciclo de vida de sistemas de geração de energia.

1.4.

Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada em seis capítulos, incluindo esta introdução.

O capítulo 2 apresenta os resultados da revisão da literatura e análise documental sobre avaliação do ciclo de vida (ACV), com foco em estudos de ACV espacial, temporal e espaço-temporal. Ao final do capítulo, apresentam-se dois quadros-síntese com os resultados da revisão de 28 estudos publicados período de 2010 a 2023, focalizando aplicações de ACV em sistemas de geração de energia hidrelétrica.

No capítulo 3, descreve-se inicialmente a base de dados ecoinvent v3.10, escolhida como a principal fonte de dados para a fase aplicada desta pesquisa. Na sequência, apresentam-se de forma sucinta as características e funcionalidades dos *softwares* de modelagem e métodos de avaliação de impactos no ciclo de vida (AICV) identificados na revisão da literatura sobre ACV. A partir de uma análise comparativa dessas ferramentas computacionais, justificam-se as escolhas do *software* openLCA v.1.9 para a modelagem da ACV espaço-temporal e o método ReCiPe2016 para a avaliação dos impactos ambientais nos pontos intermediários e finais.

No capítulo 4, propõe-se o modelo conceitual de avaliação de ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica, segundo uma abordagem espaço-temporal.

O capítulo 5 tem por objetivo demonstrar a aplicabilidade do modelo conceitual a partir dos resultados de um estudo empírico realizado em uma usina hidrelétrica localizada no Brasil, a Usina Hidrelétrica Sinop.

No capítulo 6, formulam-se as conclusões da pesquisa e endereçam-se recomendações para estudos futuros, como desdobramentos naturais e aprofundamento de aspectos relevantes que emergiram desta dissertação.

2

Avaliação do ciclo de vida: revisão da literatura e análise documental

Apresentam-se os resultados da revisão da literatura e análise documental sobre avaliação do ciclo de vida (ACV) espacial, temporal e espaço-temporal, incluindo um quadro-síntese com os resultados da revisão de 28 estudos que focalizaram aplicações de ACV em sistemas de energia hidrelétrica. A pesquisa bibliográfica foi conduzida mediante a busca de documentos nas bases de dados Scopus, Web of Science, Science Direct, Engineering Village e Google Scholar, cobrindo o período de 2010 a 2023.

2.1.

Evolução da produção científica sobre avaliação do ciclo de vida

A Figura 2.1 mostra a evolução da produção científica sobre ACV temporal, ACV espacial e ACV espaço-temporal no período 2000-2023.

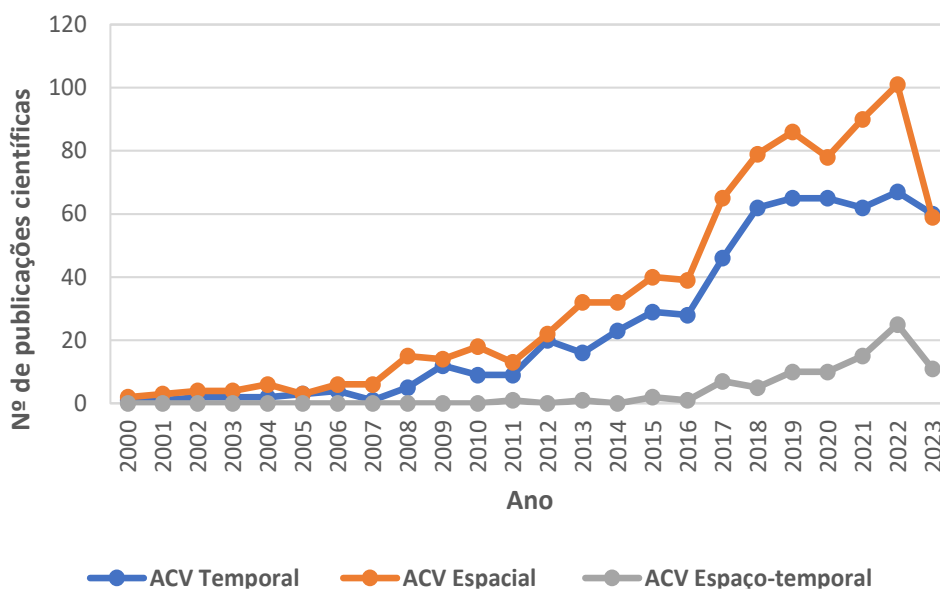


Figura 2.1 – Evolução da produção científica sobre ACV temporal, espacial e espaço-temporal: 2000 - 2023

Fonte: Elaboração própria, a partir de consulta à base Scopus.

Como mencionado anteriormente, a avaliação do ciclo de vida (ACV) foi originalmente desenvolvida segundo uma abordagem que presumia a

homogeneidade espacial e temporal do ambiente analisado (Owens, 1997; Bare et al., 1999; Reap et al., 2008a, 2008b; Guinee et al., 2011; Jolliet et al., 2016). Uma busca na base de dados Scopus revelou que, no período de 2000 a 2023, foram publicados 20.503 artigos sobre ACV. No entanto, ao comparar esse número com as publicações sobre ACV temporal, espacial ou espaço-temporal no mesmo período, percebe-se que o percentual de estudos que adotam abordagens dinâmicas de ACV ainda é baixo em comparação com a ACV convencional. Conforme ilustrado na Figura 2.1, apenas a partir de 2016 houve um aumento no número de estudos de ACV que incorporam considerações espaciais e temporais ao longo do ciclo de vida do produto em análise.

Os estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV) podem ser classificados segundo dois tipos distintos de modelagem: (i) atribucional; e (ii) consequential. Esses tipos de modelagem apresentam diferenças significativas em seus objetivos, escopo, limites do sistema, metodologia, natureza dos dados e aplicações previstas (Brander et al., 2009; Earles e Halog, 2011; Rajagopal, 2016; Reap et al., 2008a, 2008b; Beloin-Saint-Pierre, 2012; Sharma e Gupta, 2019).

A modelagem atribucional considera a relação entre as entradas e saídas do sistema, considerando coprodutos e realizando alocação, se necessário. Faz a avaliação dos impactos ambientais do berço ao túmulo, desconsiderando efeitos indiretos, e tende a ser utilizada em sistemas estáticos. Por outro lado, a modelagem consequential, em resumo, busca incluir no modelo as consequências das escolhas e de mudanças a nível de construção, produção, operação, consumo e descarte de um bem ou serviço (Earles e Halog, 2011; Suh e Yang, 2014; Jones et al., 2017; Cusenza et al., 2020). É comumente utilizada em sistemas dinâmicos. A escolha do tipo de modelagem depende, portanto, do objetivo e do escopo da ACV em questão.

Considerando que a avaliação do ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica objeto desta pesquisa será conduzida segundo uma abordagem espaço-temporal, a modelagem da análise do ciclo de vida consequential (ACVC) é a recomendada por permitir antecipar os possíveis estados futuros dos referidos sistemas em diferentes cenários (Earles e Halog, 2011; Suh e Yang, 2014; Jones et al., 2017; Cusenza et al., 2020).

Nessa perspectiva, a revisão bibliográfica e análise documental sobre a avaliação espaço-temporal do ciclo de vida buscou identificar e analisar estudos

prévios relevantes para o objetivo geral desta dissertação, organizados nas seguintes subseções.

2.2.

Avaliação de ciclo de vida: referencial normativo

Em 1997, a Organização Internacional de Normalização (ISO, acrônimo em inglês) lançou a Norma ISO 14040, intitulada ‘Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura’. Cinco anos depois, a parceria internacional entre o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, acrônimo em inglês) e a *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) criaram a iniciativa UNEP/SETAC *Life Cycle Initiative* com o objetivo de promover o pensamento do ciclo de vida e facilitar a troca de conhecimento entre mais de 2.000 especialistas ao redor do mundo, além de quatro redes regionais em diferentes continentes. Uma série de outras normas foi lançada até a publicação da Norma ISO 14044 em 2006 que estabeleceu os requisitos e orientações para a execução de um estudo de avaliação de ciclo de vida (ACV).

A avaliação de ciclo de vida (ACV) é hoje uma ferramenta consolidada para mensuração dos possíveis impactos ambientais causados como resultado da produção, utilização e descarte de determinado produto ou serviço. As Normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009 constituem o referencial normativo de base para a proposição de uma metodologia para avaliação espaço-temporal de ciclo de vida de sistemas de geração e armazenamento de energia (ABNT/ISO, 2009a; 2009b).

A ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais (por exemplo, uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente) ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (i.e., do berço ao túmulo).

Segundo as referidas Normas, a ACV pode subsidiar: (i) a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seus ciclos de vida; (ii) o nível de informação dos tomadores de decisão na indústria e nas organizações governamentais ou não-governamentais (visando, por exemplo, ao planejamento estratégico, à definição de prioridades ou ao projeto ou reprojeto de produtos ou processos); (iii) a seleção de indicadores de

desempenho ambiental relevantes, incluindo técnicas de medição; e (iv) o marketing (por exemplo, na implementação de um esquema de rotulagem ambiental, na apresentação de uma reivindicação ambiental ou na elaboração de uma declaração ambiental de produto) (ABNT/ISO, 2009a, 2009b).

A Figura 2.2 apresenta as quatro fases de uma avaliação do ciclo de vida, segundo a Norma ABNT NBR ISO 14040:2009, a saber: (i) definição de objetivo e escopo; (ii) análise de inventário do ciclo de vida (ICV), mediante levantamento quantificado de dados de todas as entradas (materiais, energia e recursos) e saídas (produtos, subprodutos, emissões, etc.); (iii) avaliação de impacto do ciclo de vida; e (iv) interpretação do ciclo de vida (ABNT/ISO, 2009a).

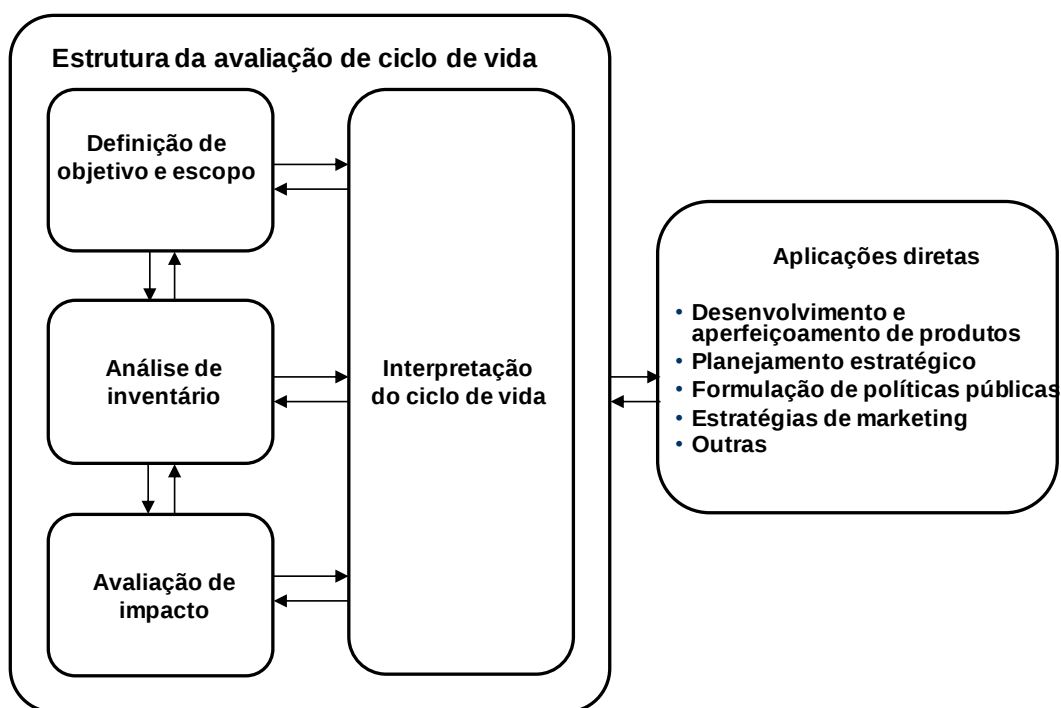


Figura 2.2 – Estrutura da ACV segundo a Norma ABNT NBR ISO 14040:2009

Fonte: ABNT/ISO (2009a).

A seguir, sintetizam-se conteúdos extraídos das Normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009 referentes às quatro fases da ACV, visando fundamentar a revisão da literatura e discussão sobre os subtemas ACV espacial, ACV temporal, ACV espaço-temporal e ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica.

2.2.1.

Definição de objetivo e escopo

O objetivo e escopo de uma ACV devem ser claramente definidos e devem ser consistentes com a aplicação pretendida. Devido à natureza iterativa da ACV, o escopo pode ter que ser ajustado durante o estudo.

Ao se definir o objetivo de uma ACV, os seguintes itens devem ser declarados de forma não ambígua: (i) a aplicação pretendida; (ii) as razões para a realização do estudo; (iii) o público-alvo, ou seja, aquele a quem se pretende comunicar os resultados do estudo; (iv) se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente (ABNT/ISO, 2009a; 2009b).

Para delimitar o escopo de uma ACV, os seguintes itens devem ser considerados e descritos de forma clara: (i) o sistema de produto a ser estudado; (ii) as funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas; (iii) a unidade funcional; (iv) a fronteira do sistema; (v) procedimentos de alocação; (vi) metodologia de avaliação de impacto (AICV) e tipos de impactos; (vii) interpretação a ser utilizada; (viii) requisitos de dados; (ix) pressupostos; (x) escolha de valores e elementos opcionais; (xi) limitações; (xii) requisitos de qualidade dos dados; (xiii) tipo de análise crítica, se aplicável; e (xiv) tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

Conforme a Norma ABNT ISO 14044:2009, o objetivo e o escopo da ACV podem ser revisados devido às limitações não previstas, restrições ou como resultado de informações adicionais. Convém que tais modificações, em conjunto com suas justificativas, sejam documentadas (ABNT/ISO, 2009a; 2009b).

2.2.2.

Análise de inventário do ciclo de vida

A análise de inventário de ciclo de vida (ICV) envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto. A condução de uma análise de inventário é um processo iterativo, pois à medida que os dados são coletados e se amplia o conhecimento sobre o sistema, novos requisitos ou limitações dos dados podem ser identificados, requerendo mudança nos procedimentos de coleta de dados, de

modo que os objetivos do estudo possam ainda ser satisfeitos, como mostra a Figura 2.3.

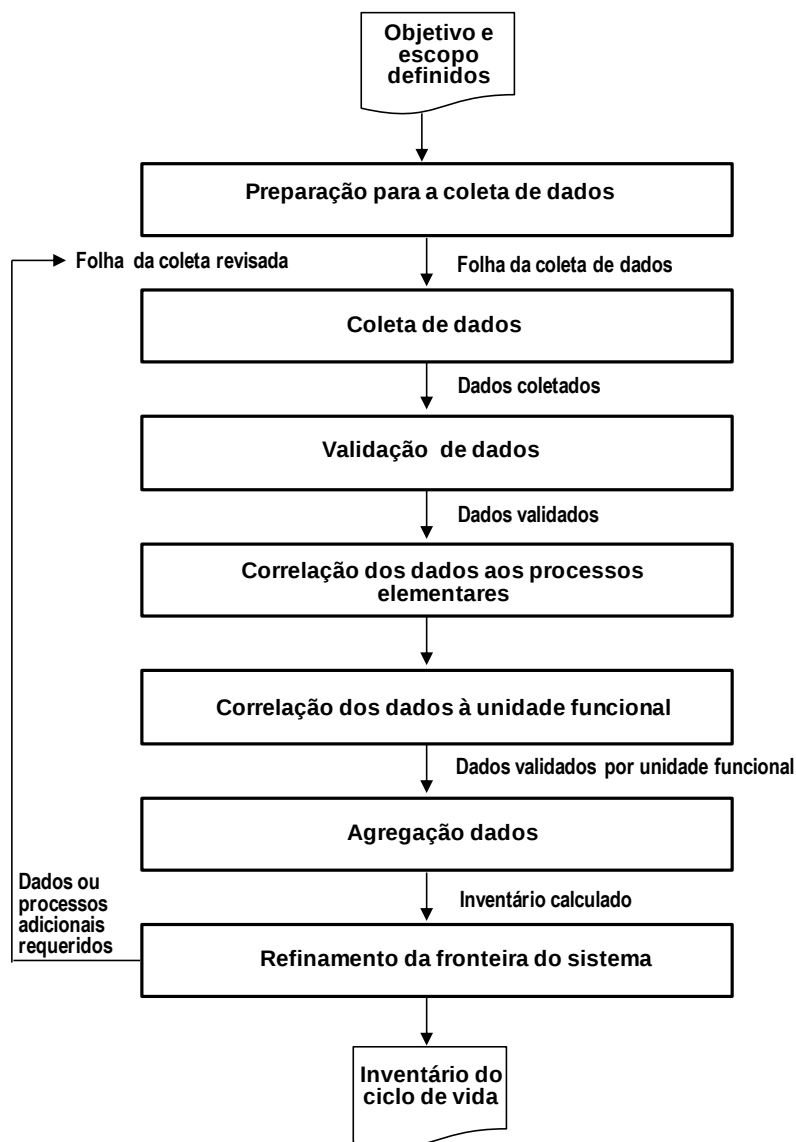


Figura 2.3 – Fluxograma do processo de uma análise de inventário

Fonte: Adaptação de ABNT/ISO (2009b).

Na etapa de coleta dos dados, para cada processo elementar dentro da fronteira do sistema, os dados podem ser classificados sob títulos gerais, incluindo: (i) entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares, outras entradas físicas; (ii) produtos, coprodutos e resíduos; (iii) emissões atmosféricas, descargas para a água e solo; e (iv) outros aspectos ambientais. Estes dados são os fluxos elementares, como representado esquematicamente na Figura 2.4.

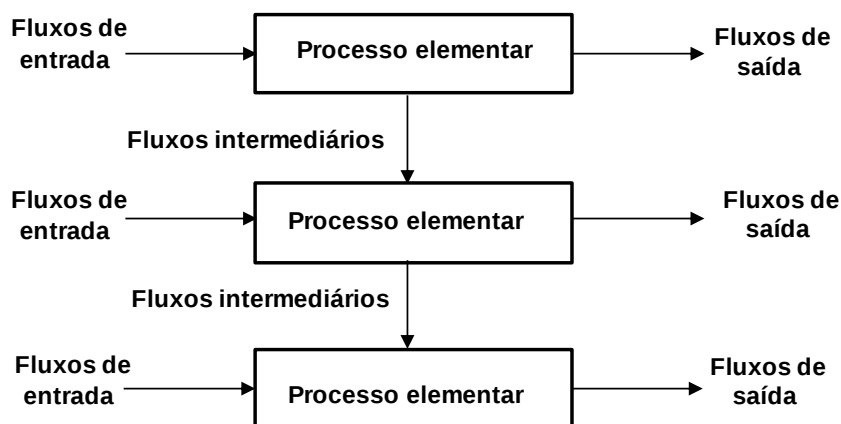


Figura 2.4 – Representação de fluxos e processos elementares

Fonte: ABNT/ISO (2009a).

Em seguida à coleta de dados, procedimentos de cálculo são necessários para gerar os resultados do inventário do sistema definido, para cada processo elementar, referidos à unidade funcional estabelecida para o sistema de produto a ser modelado. São eles: (i) validação dos dados coletados; (ii) correlação dos dados aos processos elementares; e (iii) correlação dos dados aos fluxos de referência (fluxo de processos) e à unidade funcional.

Convém que o cálculo dos fluxos energéticos leve em consideração os diferentes combustíveis e fontes de energia elétrica, a eficiência de conversão e distribuição do fluxo de energia, assim como as entradas e saídas associadas à geração e uso daquele fluxo de energia.

Quanto à alocação de fluxos e liberações, poucos processos industriais geram uma única saída ou são baseados em uma relação linear entre entradas de matérias-primas e saídas. De fato, a maioria dos processos industriais fornece mais de um produto e estes reciclam como matéria-prima produtos intermediários ou descartados.

2.2.3. Avaliação de impacto do ciclo de vida

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados do ICV. Em geral, esse processo envolve associar dados de inventário com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria, tentando dessa forma entender tais impactos, como indicado na Figura 2.5, a seguir.

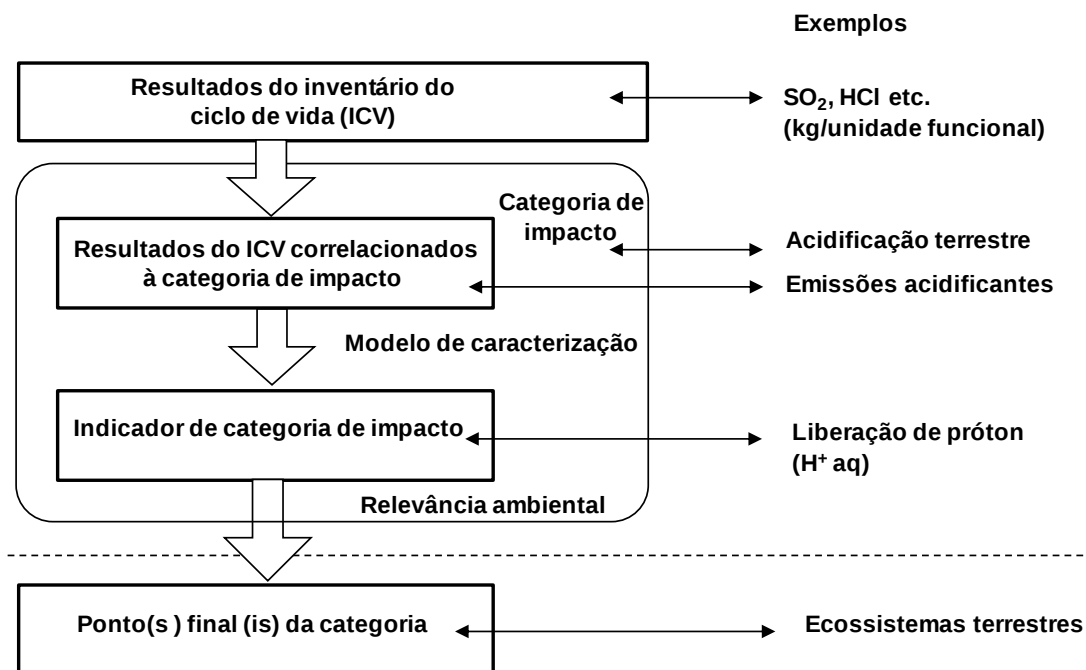


Figura 2.5 – Conceitos de impactos de categorias

Fontes: ABNT/ISO (2009b).

Os elementos mandatórios da AICV são: (i) seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização; (ii) correlação de resultados do ICV (classificação); (iii) cálculo de resultados dos indicadores de categoria (categorização); e (iv) resultados dos indicadores de categoria, resultados da AICV (perfil da AICV). Além desses elementos, as Normas definem como elementos opcionais o cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores relativamente a informações de referência (normalização), agrupamentos e ponderação.

A avaliação do impacto do ciclo de vida pode incluir o processo iterativo de análise crítica do objetivo e escopo do estudo de ACV, para determinar se os objetivos do estudo foram atingidos ou para modificar o objetivo e escopo se a avaliação indicar que eles não podem ser alcançados. Questões como escolha, modelagem e avaliação de categorias de impacto podem introduzir subjetividades na fase de AICV. Portanto, a transparência é um fator crítico na avaliação de impacto para assegurar que os pressupostos estejam claramente descritos e relatados. A fase de AICV também fornece informações para a fase de interpretação do ciclo de vida (ABNT/ISO, 2009b).

2.2.4. Interpretação do ciclo de vida

A interpretação do ciclo de vida é a fase em que as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto. No caso de estudos de ICV, somente as conclusões da análise de inventário serão consideradas. Convém que a fase de interpretação da ACV forneça resultados que sejam consistentes com o objetivo e escopo definidos e que levem a conclusões, expliquem limitações e provejam recomendações (ABNT/ISO, 2009b).

Convém que a interpretação reflita o fato de que os resultados de AICV são baseados em uma abordagem relativa, que indicam efeitos ambientais potenciais e que não preveem impactos reais sobre os pontos finais de categoria, a extrapolação de limites, margens de segurança ou riscos. As constatações dessa interpretação podem tomar a forma de conclusões e recomendações aos tomadores de decisão, consistentes com o objetivo e escopo do estudo.

A interpretação do ciclo de vida também visa a fornecer uma apresentação prontamente compreensível, completa e consistente dos resultados de uma ACV, de acordo com a definição de objetivo e escopo do estudo. Esta fase pode envolver o processo iterativo de analisar criticamente e revisar o escopo da ACV, assim como a natureza e qualidade dos dados coletados, de forma consistente com o objetivo definido.

2.3. Estudos de ACV espacial

A diferenciação espacial na fase de inventário da avaliação do ciclo de vida tem por objetivo distinguir fatores de caracterização (FC) em relação às categorias de impacto e analisar a variação espacial do ambiente receptor e sua sensibilidade.

Já nos primeiros estudos de ACV na década de 90, havia sido ressaltada a importância de se considerar a variabilidade dos efeitos dos fluxos elementares em diferentes regiões (Potting e Blok; 1995; Potting e Hauschild, 1997; Alting et al., 1997). Os aspectos variáveis de um local podem ser definidos em diferentes categorias, como geologia, topografia, cobertura do terreno e condições meteorológicas.

A título de ilustração, Potting et al. (1998) avaliaram uma variação de três ordens de magnitude para o efeito de acidificação ou eutrofização proveniente de

certos fluxos elementares em diferentes regiões da Europa. Outros estudos demonstraram uma considerável variabilidade nos fatores de ingestão (*intake fraction*) em relação à espacialização das emissões de substâncias para a Europa (Pennington et al., 2004) e para o Canadá (Manneh et al., 2012). Esses exemplos, que apresentam variações de várias ordens de magnitude entre diferentes locais para as fontes de fluxos elementares confirmam a necessidade de considerar as especificidades espaciais na modelagem de ACV.

Para fins do presente estudo, é importante distinguir entre as categorias de impactos globais e os impactos regionais. O aquecimento global e a destruição da camada de ozônio são categorias de impactos globais. Por outro lado, a eutrofização (aquática e terrestre), a acidificação (aquática e terrestre), a formação de ozônio fotoquímico, a toxicidade humana, a ecotoxicidade, o uso da terra, o consumo de água e o uso de recursos abióticos e bióticos são categorias de impactos regionais (Sonnemann et al. 2011).

Para avaliar a distribuição geográfica dos impactos ambientais na ACV, Potting e Hauschild (2006) introduziram a variação espacial por meio da divisão do mundo em vários tipos de fontes de matérias-primas e em ambientes que recebem estes recursos. Dessa forma, os impactos ambientais puderam ser caracterizados para cada local de acordo com o tipo de recurso recebido, por meio de fatores de caracterização.

De forma semelhante, Raugei e Ulgiati (2009) abordaram a variação espacial em nível global, definindo nove regiões politicamente similares, a saber: (i) países da OCDE; (ii) países da OCDE da América do Norte; (iii) países da OCDE do Pacífico; (iv) países africanos; (v) países da América Latina; (vi) países asiáticos (excluindo a China); (vii) China; (viii) países da ex-URSS; e (ix) países do Oriente Médio. De acordo com cada região, os autores avaliaram a produção das matérias-primas, a quantidade de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) necessária durante todo o ciclo de vida e o uso de energia elétrica, de forma a atribuir percentuais a serem considerados na avaliação de cada impacto ambiental.

Mutel e Hellweg (2009) propuseram um novo tipo de propagação da caracterização espacial dos processos durante a etapa de cálculo do inventário do ciclo de vida (ICV). O princípio básico desse método proposto por Mutel e Hellweg foi utilizar a estrutura específica das matrizes ambientais (E) e

tecnológicas (T) que descrevem um determinado sistema, a fim de propagar a caracterização espacial desse sistema na etapa de cálculo do ICV conjuntamente com a modelagem de impactos.

Mediante o emprego de sistemas de informações geográficas (SIG) em ACV, diversos autores propuseram a integração das considerações espaciais aos processos e seus fluxos elementares associados (Mutel et al., 2011; Liu et al., 2014; Karlsson et al., 2017; Hiloidhari et al., 2017; dentre outros).

Mutel et al. (2011) propuseram um método para ACV espacial fazendo uso de um sistema de informação geográfica (SIG) para obter informações regionais e integrá-las a estudos de inventários de ciclo de vida. Os autores partiram do pressuposto de que havia incertezas espaciais nas bases de dados e buscaram reduzi-las, a fim de escolher a escala espacial ótima dos métodos de avaliação de impacto.

Para Liu et al. (2014), a regionalização da ACV refere-se à conversão dos resultados de ACV genérica (ou dependente do local) em unidades espaciais menores. Os autores concluíram que a regionalização das ACV pode ser alcançada por um SIG. Isso porque o sistema pode alocar facilmente o impacto em unidades espaciais menores por meio da análise de sobreposição de camadas de destino, exposição e efeito.

Hiloidhari et al. (2017) discutiram inicialmente a importância de se utilizar ferramentas geoespaciais, como os sistemas de informações geográficas (SIG), com o intuito de incluir parâmetros espaciais na avaliação de resíduos agrícolas, no planejamento logística da produção e distribuição de biomassa e no projeto da usina de bioenergia. Na sequência, demonstraram os benefícios de se integrar SIG à ACV para superar as limitações da ACV convencional e gerar uma avaliação holística dos impactos ambientais da bioenergia.

Tabatabaie et al. (2018) desenvolveram um modelo de ACV regional, incluindo análise econômica da produção de biodiesel nos EUA na região noroeste do Pacífico, ressaltando as diferenças nas bases de dados de inventário do ciclo de vida em diferentes regiões. Por sua vez, Othoniel et al. (2019) usaram fatores de caracterização (FC) específicos para a região de Luxemburgo para fornecer uma avaliação mais representativa do uso da terra naquela região.

Visando desenvolver um inventário de ciclo de vida (ICV) para turbinas eólicas sob medida, realizado por meio de parametrização, Sacchi et al. (2019)

levantaram informações geoespaciais de cada aerogerador e para o estudo do inventário em si. Observaram as entradas e saídas da produção em função do contexto geográfico. No caso da fase de uso, a localização das turbinas foi influenciada pela quantidade de horas de vento disponível e força dos ventos, relacionadas à velocidade e produção de energia.

Dentre os modelos para cálculo de impactos ambientais que consideram o efeito da variabilidade espacial das fontes de fluxos elementares, destacam-se os estudos prévios de Owens (1997); Potting e Hauschild (1997); Bare et al. (1999); Pennington et al. (2004); Reap et al. (2008) e Dyckhoff e Kasah (2014). Esses estudos consideraram a variabilidade espacial dos mecanismos ambientais que são utilizados para definir os fatores de caracterização (FC) em diferentes métodos que vem sendo empregados para mensuração dos impactos ambientais.

Embora a Norma ABNT NBR ISO 14044:2009 indique que é necessário agrupar os dados da modelagem de sistemas para compor o ICV antes da modelagem propriamente dita dos impactos ambientais, ela não especifica objetivamente como os dados devem ser agrupados. Beloin-Saint-Pierre (2012) considera viável dissociar os fluxos elementares de um inventário do ciclo de vida (ICV) com base em suas caracterizações espaciais para modelagem pretendida. Nessa perspectiva, o cálculo de um ICV caracterizado espacialmente refere-se ao modo de caracterização espacial dos fluxos elementares e ao modo de caracterização espacial dos processos (Beloin- Saint-Pierre, 2012).

Em síntese, as características espaciais observadas e que podem ser incluídas nos estudos de ACV são: (i) informações sobre o local; (ii) condições geográficas (tipo de ambiente de referência, por exemplo, tipo de solo, disponibilidade de água); (iii) propriedades específicas do local que não estão diretamente ligadas ao ambiente, por exemplo, densidade populacional e se a região é urbana ou rural (Beloin-Saint-Pierre, 2012).

É importante ressaltar que a modelagem de sistemas sempre foi realizada com certo nível de caracterização espacial e que o nível de descrição espacial de diferentes valores que definem processos e sistemas nas bases de dados existentes constitui ainda um obstáculo para considerar as especificidades espaciais em estudos de ACV nos mais diversos contextos. De fato, a descrição espacial necessária para associar fluxos elementares aos fatores de caracterização (FC) nem sempre está disponível. No entanto, na versão mais recente da base de dados

ecoinvent v3.10), disponibilizada em novembro de 2023 e empregada na presente pesquisa, aprimoramentos foram introduzidos visando tratar essa lacuna.

A análise dos desenvolvimentos recentes para considerar as especificidades espaciais durante diferentes estudos de ACV indicaram que: (i) a importância de considerar as especificidades espaciais para a modelagem de sistemas e algumas categorias de impactos ambientais foi demonstrada por vários estudos; (ii) existem algumas metodologias de modelagem de impactos ambientais que consideram as especificidades espaciais do ambiente em relação a diferentes tipos de fluxos elementares; e (iii) a caracterização espacial das bases de dados atuais ainda não corresponde completamente às necessidades das metodologias de modelagem de impactos ambientais que consideram a variabilidade espacial.

2.4.

Estudos de ACV temporal

A inclusão de considerações temporais na ACV é uma das questões que não foram definidas suficientemente nas Normas ABNT ISO 14040:2009 e 14040:2009. A evolução da produção científica sobre ACV representada na Figura 2.1 mostra que os estudos que adotaram a abordagem temporal não atingiram o mesmo nível que os estudos de ACV espacial no período de 2000 a 2023.

Considerações temporais nas avaliações de ciclo de vida geralmente têm sido perdidas durante o cálculo do inventário do ciclo de vida (ICV), gerando-se resultados com alto grau de agregação dos impactos potenciais e de incerteza. No entanto, nos últimos 20 anos, diversos estudos buscaram incluir considerações temporais no enquadramento conceitual da ACV e demonstrar que a contabilização de tais aspectos afeta significativamente os resultados de inventários (ICV) e análises de impacto do ciclo de vida (AICV), como será discutido a seguir.

Para Owens (1997a), a diferenciação temporal se perde no método de agregação de dados de inventário na AVC convencional. Tal limitação leva a imprecisões na avaliação de impactos, a qual por si só pode ser uma função do tempo. Em um segundo trabalho, o autor forneceu um exemplo sobre impactos na saúde humana, em que informações sobre os momentos de emissão

(concentrações) e tempos de exposição foram considerados relevantes (Owens, 1997b).

Anos depois, Finnveden (2000) ressaltou que a escolha do horizonte temporal da ACV pode ter uma influência decisiva no resultado da avaliação, especialmente ao avaliar emissões de metais pesados no longo prazo em locais de concentração de resíduos municipais. Segundo esse autor, a escolha do horizonte temporal é, principalmente, uma questão ética sobre os direitos das gerações futuras.

Para incluir as considerações temporais na ACV, um número crescente de abordagens vem sendo desenvolvidas, como será mostrado a seguir, porém sua adoção na prática ainda se encontra incipiente, o que levanta preocupações sobre a representatividade dos resultados atuais de ACV nos mais diversos contextos.

A título de ilustração, Shah e Ries (2009) demonstraram uma variabilidade temporal de cerca de dois níveis de magnitude para a exposição humana a emissões de NO_x, dependendo do momento em que as emissões ocorrem. Assim como a variabilidade espacial, abordada na subseção 2.3, a variabilidade temporal é importante para determinadas categorias de impacto. Categorias de impacto identificadas como suscetíveis à variação temporal das emissões são, por exemplo, consumo de água, disponibilidade de água, emissões de gases de efeito estufa em função do uso da terra e criação de oxidantes fotoquímicos (Sonnemann et al. 2011).

Levasseur et al. (2010) desenvolveram um método de modelagem de impactos que integra as considerações de aspectos temporais, com o objetivo de avaliar os efeitos de gases de efeito estufa em diferentes horizontes temporais. Este método dinâmico de modelagem de impactos ambientais requer, portanto, um conhecimento sobre a duração dos fluxos elementares em relação ao horizonte temporal considerado.

Sohn et al. (2020), Lueddeckens et al. (2020), Beloin-Saint-Pierre et al. (2020) e Rahn et al. (2023) publicaram artigos de revisão da literatura sobre abordagens propostas para ACV temporal, que serão aqui sintetizados.

Sohn et al. (2020) classificaram os estudos incluídos em sua revisão segundo três tipos: (i) inventário de processo dinâmico; (ii) inventário de sistema dinâmico; e (iii) caracterização dinâmica, concentrando-se na preocupação com mudanças nas atividades humanas e respostas ambientais, com diversos exemplos

de implementação. Além disso, distinguiram a ACV dinâmica completa da ACV dinâmica parcial. Segundo os autores, as mudanças induzidas pelo tempo na primeira alternativa são incorporadas em todas as quatro etapas da ACV. Já na segunda, a maioria dos estudos de ACV incluídos em sua revisão limitou-se a determinados aspectos de dinamização, razão pela qual são chamados de ACV dinâmica parcial.

Lueddeckens et al. (2020) realizaram uma revisão sistemática da literatura cobrindo 60 estudos publicados até o final de 2018, buscando evidenciar as interdependências e soluções endereçadas a seis abordagens dinâmicas que podem introduzir um componente temporal na ACV tradicional, a saber: (i) horizonte de tempo; (ii) desconto; (iii) resolução temporal do inventário; (iv) caracterização dependente do tempo; (v) ponderação dinâmica; e (vi) normalização dependente do tempo. Essas seis abordagens aplicáveis nas quatro etapas de uma ACV tradicional (i.e., definição do objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida, avaliação do impacto do ciclo de vida e interpretação) podem ser designadas para cada uma das referidas etapas. Os autores concluíram que aspectos temporais na ACV, especialmente os inventários diferenciados temporalmente e a caracterização dependente do tempo, podem aumentar significativamente a precisão das avaliações pretendidas. No entanto, destacaram que a inclusão de análises de sensibilidade são cruciais para uma melhoria adicional na análise dos aspectos dinâmicos da ACV.

Na revisão sistemática da literatura conduzida por Beloin-Saint-Pierre et al. (2020), cobrindo 53 artigos sobre ACV temporal até 2019, os autores identificaram diversas abordagens sobre como incluir considerações temporais em avaliações de ciclo de vida em diferentes setores (por exemplo, agricultura, construção e energia), bem como no contexto geral da ACV. A partir desse mapeamento, os autores propuseram um modelo que contempla caminhos para inclusão das considerações temporais no enquadramento conceitual da ACV, além das abordagens dinâmicas descritas em trabalhos prévios. Três áreas focais foram consideradas chave para integrar considerações temporais na estrutura analítica da ACV: (i) definição do escopo temporal e da distribuição das emissões segundo o escopo definido; (ii) uso de informações específicas para modelar sistemas e impactos associados; e (iii) seleção do nível apropriado de resolução temporal para descrever as variações de fluxos e fatores de caracterização dinâmica. Ao

abordar mais considerações temporais no enquadramento conceitual de ACV temporal, Beloin-Saint-Pierre et al. (2020) pressupõem que haverá redução das incertezas nas avaliações e maior representatividade dos resultados. No entanto, alertam para possíveis compensações entre esforços adicionais de coleta de dados e para o aumento do valor dos resultados da ACV temporal.

Em um artigo mais recente de revisão bibliográfica sobre ACV temporal, Rahn et al. (2023) mapearam diferentes opções de dinamização, como, p.ex., ponderação dinâmica e inventário dinâmico de ciclo de vida, destacando as vantagens e limitações de cada uma das opções analisadas. A seguir, apresenta-se uma síntese da revisão publicada por esses autores, em linha com os trabalhos prévios de revisão (Sohn et al., 2020; Lueddeckens et al., 2020; e Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

Na primeira fase dos estudos de ACV temporal, o objetivo foi determinar um horizonte temporal apropriado para a avaliação, juntamente com os limites do sistema, a unidade funcional, as limitações e suposições subjacentes. De acordo com Dyckhoff e Kasah (2014), a escolha de um horizonte temporal adequado constitui um desafio. Deve-se fazer uma distinção se o horizonte temporal cobrirá a duração do ciclo de vida do produto, a duração da modelagem do inventário ou a duração da avaliação de impacto. Horizontes temporais típicos são identificados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (sigla em inglês, IPCC) como 20, 100 e 500 anos (Shukla et al., 2022). Horizontes temporais curtos enfatizam os processos de curto prazo das mudanças climáticas, podendo impactos ecológicos ser superestimados nesses horizontes. Já horizontes temporais longos tendem a focar nos processos de longo prazo e podem levar a uma subestimação (Lueddeckens et al., 2020).

A seleção de um horizonte temporal apropriado influencia o cálculo e a interpretação dos resultados, mas não o processo de avaliação em si. Na maioria dos estudos, um horizonte temporal de 100 anos tem sido escolhido, com base em um padrão informal, conforme definido na Norma ISO 14067 sobre pegada de carbono e no Protocolo de Kyoto (Fearnside, 2002).

Uma vez definidos o objetivo e o escopo do estudo de ACV, a fase subsequente refere-se ao inventário do ciclo de vida dinâmico, considerando-se parâmetros temporais. Este é realizado pela coleta de dados diferenciados temporalmente em cada ponto no tempo. Portanto, o ciclo de vida de um produto

é dividido em pequenos intervalos de tempo ou segmentos e simulado com base em dados históricos ou simulações prospectivas de desenvolvimentos e cenários futuros (Su et al., 2021). No entanto, a elaboração de um inventário dinâmico pode ser muito demorada, pois é necessário coletar muitas informações sobre processos de fundo e de primeiro plano, mas também considerar certos aspectos temporais para colocá-los na linha do tempo do ciclo de vida de um produto (Collinge et al., 2013).

Filleti et al. (2014), por exemplo, utilizaram a ferramenta DyPLCA (*software* para cálculo de ICV temporal LCI para ACV dinâmicos) para realizar uma ACV para o estudo de caso de uma máquina de moagem e conseguiram observar grandes diferenças no consumo de eletricidade e água, assim como nos impactos ambientais, em comparação com abordagens de ACV estáticas.

Beloin-Saint-Pierre et al. (2014) propuseram o método *Enhanced Structural Path Analysis* (ESPA), que permite definir marcos temporais associados às entradas do inventário do ciclo de vida (ICV). Informações temporais adicionais dos processos elementares, além das disponíveis nas bases de dados de inventários contemporâneas, permitem uma avaliação de impacto mais precisa, devendo, no entanto, ser incluídas após análise caso a caso (Pinsonnault et al., 2014). Outra possibilidade dinâmica é aplicar fatores de caracterização dinâmicos na fase seguinte da ACV, ou seja, na avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV).

Outros estudos utilizaram ferramentas dinâmicas especiais, como a ferramenta Temporalis (Cardellini e Mutel, 2018), implementada como parte do *framework* de código aberto Brightway2. Dois anos depois, Pigne et al. (2020) desenvolveram uma ferramenta baseada na web DyPLCA, dando um primeiro passo para a distribuição temporal de inventários, porém limitando-se a determinados processos ou fases do ciclo de vida.

Durante a AICV, os impactos ambientais são avaliados com base nos dados coletados na fase de ICV dinâmico. Neste processo, as entradas e saídas do inventário são atribuídos a diferentes categorias de impacto. Os fatores de caracterização dinâmicos são fortemente dependentes do horizonte temporal e alteram a sensibilidade do ecossistema ao longo do tempo. Isso significa que as emissões no início do ciclo de vida recebem uma ponderação maior devido à sua característica de redução, do que aquelas próximas ao final do horizonte temporal considerado (Lueddeckens et al., 2020).

Levasseur et al. (2010) desenvolveram uma calculadora de pegada de carbono dinâmica chamada dynCO₂, que permite calcular as emissões de gases de efeito estufa para períodos específicos em termos de forçamento radiativo, i.e., segundo a diferença entre a radiação solar absorvida pela Terra e a energia radiada de retorno. Essa diferença é causada, por exemplo, por emissões de CO₂, NO_x ou vapor de água (H₂O), cujos perfis temporais podem ser considerados, usando-se a abordagem mencionada, de modo que o resultado da ACV para cada emissão seja uma função do tempo, em vez de um único valor. No entanto, o uso da caracterização dinâmica é muito dependente do tempo e requer a aplicação de múltiplos horizontes temporais para uma avaliação holística.

Apesar do surgimento de novas perspectivas que podem ser oferecidas por fatores de caracterização dinâmica, especialmente para ciclos de vida longos, é importante que as abordagens dinâmicas mapeiem de maneira transparente as sensibilidades de diferentes pressuposições temporais. Além disso, a caracterização dependente do tempo é principalmente limitada ao potencial de aquecimento global (GWP) e toxicidade (Su et al., 2021) e envolve muitas incertezas, o que torna complexa a comparação com resultados estáticos (Ericsson et al., 2013).

De acordo com Yuan e Dornfeld (2009), quanto maior a vida útil de um produto, maior a incerteza na escala de tempo. Isso se deve principalmente à imprevisibilidade dos avanços tecnológicos ou a medidas políticas imprevisíveis que, por exemplo, prescrevem certas ações ou restringem processos. Para incluir esse efeito no cálculo, pode ser introduzida uma ponderação ou desconto. Com a ponderação dinâmica (e a normalização dinâmica), as emissões são calculadas em uma escala de tempo para cada ano. Ao contrário das trajetórias reais de emissão, que são consideradas como uma função ao longo do tempo no caso da caracterização dinâmica, um valor absoluto da emissão é assumido e ponderado, usando-se uma taxa de desconto definida anualmente. Isso é feito com base no princípio de que os impactos ecológicos que ocorrem mais cedo são têm peso maior do que aqueles que ocorrem mais tarde (Su et al., 2021).

De acordo com Lueddeckens et al. (2022), a escolha de uma taxa de desconto apropriada tem um impacto muito alto no resultado, pois uma taxa de desconto muito alta pode levar a uma subestimação do impacto ambiental e prejudicar ainda mais o meio ambiente (Yuan e Dornfeld, 2009).

As taxas de desconto frequentemente utilizadas na literatura estão geralmente entre 1-10% (Yuan e Dornfeld, 2009; Lueddeckens et al., 2022; Boucher, 2012). No entanto, deve-se discutir detalhadamente, dependendo do caso de uso específico, a utilidade de se adotar uma taxa de desconto e se essa taxa deve ser dependente do tempo (Su et al., 2021). Fearnside (2002), por exemplo, propôs uma abordagem chamada índice de peso de gerações, que reduz a taxa de desconto após cada geração. Também pode ser útil criar um modelo que reflita o comportamento real das emissões do ciclo de vida no ambiente, i.e., um mecanismo de degradação ambiental (Zhai, Crowley e Yuan, 2011).

Devido à falta geral de consenso sobre os fatores dinâmicos de ponderação e normalização existentes, a introdução de taxas de desconto leva a várias incertezas adicionais que, minimizam os impactos ambientais reais no pior caso. Portanto, a aplicação de uma ponderação ou desconto dinâmico ainda é uma questão controversa no campo da ACV (Levasseur et al., 2013).

A título de ilustração, estudos de ACV de sistemas com vida útil longa (por exemplo, edificações) podem se beneficiar de modelos e ferramentas nos quais a dinâmica dos fluxos de energia é considerada. Períodos de validade para conjuntos de dados, que representam tecnologias em rápida evolução (por exemplo, células fotovoltaicas), são informações temporais importantes, fornecidas em algumas bases de dados de ACV. Além disso, métodos dinâmicos de AICV foram desenvolvidos para considerar impactos que variam significativamente quando o momento das emissões muda. Em geral, as abordagens, ferramentas e estratégias sugeridas aumentam a representatividade temporal dos estudos de ACV e diminuem a incerteza temporal dos modelos da tecnosfera, i.e., das estruturas constituídas pelo trabalho humano no espaço da biosfera, e seus impactos. No entanto, seu uso em estudos de ACV atuais ainda é incipiente, o que pode ser explicado principalmente pela falta de descrições consistentes e pelos desafios de reunir informações temporais (Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

Em termos gerais, deve-se também indicar que a inclusão de parâmetros temporais em estudos de ACV deu origem ao uso do termo 'dinâmico', hoje frequentemente utilizado. Várias publicações descrevendo a consideração de especificidades temporais são definidas como estudos de ACV dinâmica. No entanto, o termo 'dinâmico' ainda não está bem definido nos documentos de

referência de ACV, podendo descrever diferentes perspectivas ou visões das considerações temporais, ou seja, pode se referir a uma caracterização temporal explícita dos sistemas durante suas modelagens ou a uma consideração explícita da variabilidade temporal dos impactos ambientais de diferentes emissões ao longo do tempo (Beloin-Saint-Pierre et al., 2020).

A análise dos desenvolvimentos recentes para considerar as especificidades espaciais durante diferentes estudos de ACV indicaram que: (i) a utilização do termo ‘dinâmico’ apresenta um problema devido à sua aplicação em diferentes conceitos; (ii) a consideração de especificidades temporais para a modelagem de sistemas em certas categorias de impactos ambientais foi demonstrada como importante por alguns estudos; (iii) existem métodos de modelagem de impactos ambientais que consideram as especificidades temporais do ambiente em relação a um tipo de fluxo elementar; (iv) a caracterização temporal das bases de dados atuais é ainda incipiente, o que resulta em uma modelagem muito imprecisa dos impactos ambientais em relação ao que é realmente vivenciado.

2.5.

ACV espaço-temporal

A inclusão de considerações espaço-temporais na avaliação do ciclo de vida de um determinado produto ou serviço constitui hoje uma área de fronteira do conhecimento sobre ACV, como mostra a Figura 2.1. A evolução da produção científica sobre ACV espaço-temporal iniciada a partir de 2015 indica que o número de publicações se encontra bem abaixo dos estudos de ACV espacial ou temporal.

Herrchen (1998) sugeriu pela primeira vez envolver a dinâmica espaço-temporal nas pesquisas sobre ACV. No entanto, embora tenha havido um grande e rápido progresso no campo de pesquisa da ACV, ainda existem algumas limitações. Em primeiro lugar, há poucos estudos analisando e quantificando sistematicamente variações dinâmicas espaço-temporais, pois a grande maioria envolve apenas alguns fatores dinâmicos específicos. Em segundo lugar, são ainda poucos os modelos de ACV abrangentes e operacionais, que combinem variações temporais e espaciais conjuntamente e que possam ser aplicados em maior escala.

Nesta subseção, busca-se focalizar os poucos estudos de ACV espaço-temporal identificados na presente pesquisa bibliográfica (Beloin-Saint-Pierre,

2012; Beloin-Saint-Pierre et al., 2014; Olkkonen e Syri, 2016; Maier, 2017; Maier, Mueller e Yan, 2017; Sacchi et al., 2019; Kumar et al., 2019; e Su et al., 2022; Zhu et al., 2022).

Segundo Beloin-Saint-Pierre et al. (2014), a importância de se adotar uma abordagem de ACV que considere as variações espaciais e temporais em conjunto vem sendo ressaltada na literatura especializada. No entanto, a fase de cálculo do inventário de ciclo de vida (ICV) espaço-temporal ainda é uma questão complexa ao considerar sua implementação. Nessa perspectiva, os autores propuseram uma nova metodologia de cálculo analítico para obter inventários definidos espaço-temporalmente, que intitularam de método *Enhanced Structural Path Analysis* (ESPA⁺). Esse método aproveita as capacidades de propagação de informações espaciais para melhorar a gestão da informação temporal. Um cenário simplificado de produção de eletricidade fotovoltaica (PV) ilustrou como e onde as informações espaço-temporais precisam ser definidas para as etapas de cálculo do ICV segundo essa abordagem. No entanto, conforme os autores, o exemplo de produção de eletricidade fotovoltaica (PV) descreveu apenas parte do potencial de uso da metodologia ESPA, pois na época do estudo as informações da base de dados utilizada necessitavam ser aprimoradas no nível espaço-temporal para que o método ESPA⁺ alcançasse seu potencial máximo (Beloin-Saint-Pierre et al., 2014).

Olkkonen e Syri (2016) descrevem variações espaciais e temporais de curto prazo (2009-2010) e de longo prazo (até 2030) nos países nórdicos e nos sistemas de energia europeus, se baseando no atendimento de demanda na margem e observando como a matriz elétrica tende a impactar, de acordo com sua variabilidade no período e local de produção de energia.

Atilgan et al. (2016) avaliaram a sustentabilidade do ciclo de vida do setor elétrico na Turquia, considerando os impactos ambientais, econômicos e sociais das diferentes fontes presentes na matriz elétrica do país. Embora os autores não tenham mencionado explicitamente o uso da abordagem de ACV espaço-temporal, eles consideraram tanto parâmetros temporais quanto espaciais em sua avaliação da sustentabilidade do setor elétrico na Turquia. A análise temporal considerou o ano base de 2010, enquanto os parâmetros espaciais incluíram a localização geográfica das usinas de energia, locais de extração de recursos e rotas de transporte. Esses elementos indicam uma consideração implícita da abordagem espaço-temporal na avaliação da ACV realizada pelos autores.

Maier (2017) desenvolveu em sua pesquisa de doutorado um ICV dinâmico, integrando informações temporais e espaciais segundo um novo enquadramento de ICV, visando produzir resultados espaço-temporais e oferecer mais *insights* para avaliações de sustentabilidade de sistemas de geração de energia. Para este enquadramento, a autora utilizou o método ESPA⁺ desenvolvido por Beloin-Saint-Pierre (2012), integrando-o a uma análise de parâmetros espaciais para determinar o ICV espaço-temporal ao longo de um ciclo de vida completo. A autora utilizou um sistema de geração de energia eólica para demonstração da aplicabilidade do modelo e uma abordagem diferente para análise espacial em escala regional. A inserção de parâmetros temporais se deu em quatro processos, para os quais a autora definiu o escopo temporal, a saber: (i) fabricação dos componentes; (ii) instalação; (iii) operação e manutenção (O&M); e (iv) descomissionamento. Com relação aos parâmetros espaciais, a autora considerou as características de cada país referente à principal localidade de produção. Por exemplo, para a produção de aço, considerou Rússia, Turquia, Ucrânia e Itália, por serem os maiores produtores de aço da Europa. Já para a produção de cobre, considerou a América Latina.

Também tratando de sistema eólicos, mais precisamente, de suas turbinas, Sacchi et al. (2019) desenvolveram um inventário de ciclo de vida (ICV) espaço-temporal a partir do levantamento de informações geoespaciais de cada aerogerador e para o estudo do ICV em si. Observaram as entradas e saídas da produção de turbinas em função do contexto geográfico. Para a fase de uso, a localização das turbinas foi influenciada pela quantidade de horas de vento disponível e a força dos ventos, relacionadas à velocidade e à produção de energia.

Kumar et al. (2019) consideraram doze usinas hidrelétricas com reservatório na China, para as quais avaliaram o risco de emissões de GEE no longo prazo e concluíram que as emissões de GEE dependem de quatro fatores: (i) idade dos reservatórios; (ii) temperatura média; (iii) precipitação média; e (iv) escoamento superficial. Com relação aos parâmetros espaciais, os autores utilizaram a ferramenta ArcGIS 10.2, que permitiu inserir informações geográficas, como precipitação média anual e escoamento médio anual em cada localidade.

Zhu et al. (2022) realizaram uma análise das emissões de GEE ao longo do ciclo de vida dos sistemas de geração de energia na China, considerando diferentes tipos de energia, escalas regional e temporal, e cenários de políticas,

com o intuito de fornecer insights para o desenvolvimento sustentável do sistema elétrico do país.

A escala espaço-temporal criada para fins do inventário de ciclo de vida no estudo em questão envolveu a análise das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida dos seis principais tipos de geração de energia na China. Essa escala considerou a avaliação das emissões em diferentes regiões geográficas (escala espacial) e ao longo do tempo (escala temporal) (Zhu et al., 2022).

Na escala espacial, foram analisadas as emissões de gases de efeito estufa em diferentes regiões da China, levando em consideração as características regionais e a composição da matriz energética de cada região. Isso permitiu avaliar as variações nas intensidades de gases de efeito estufa entre as diferentes regiões do país (Zhu et al., 2022).

Su et al. (2022) propuseram um modelo abrangente de ACV espaço-temporal, com o objetivo de analisar e quantificar detalhadamente as dinâmicas espaciais e temporais, tendo como foco um estudo empírico no setor de edificações. O estudo de Su et al. (2022) incluiu ICV e AICV espaço-temporal, apresentando os resultados de ambas as fases.

A meta-análise desses estudos mostrou que as discussões específicas sobre a pertinência dos modos de caracterização espaço-temporal dos sistemas modelados na ACV são raras e pouco desenvolvidas. A maior restrição à consideração das especificidades espaço-temporais resume-se, atualmente, ao tempo necessário para informar a desagregação espaço-temporal dos sistemas em análise. A atual especificidade espaço-temporal nas bases de dados de inventário requer um esforço adicional coleta de dados para que a modelagem de ACV se torne mais representativa com a inclusão de características espaço-temporais.

2.6.

Estudos de ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica

Com o objetivo de complementar a revisão da literatura e análise documental sobre ACV espacial, temporal e espaço-temporal, busca-se nesta seção trazer um olhar sobre o que vem sendo pesquisado em ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica, como pano de fundo para a discussão futura sobre as contribuições desta pesquisa em relação aos estudos prévios sobre ACV desses sistemas.

O Quadro 2.1, a seguir, sintetiza 27 estudos empíricos sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica, publicados no período de 2010 a

2023, com destaque especial para os aspectos metodológicos e categorias de impacto ambiental que foram analisadas. Esta análise permitiu mapear:

- A abordagem da ACV, se convencional, espacial, temporal ou espaço-temporal;
- A modelagem de ACV, se atribucional ou consequencial;
- A fronteira do sistema, se do berço ao túmulo¹ ou do berço ao portão²;
- As fases da ACV consideradas, segundo as Normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009;
- As bases de dados e ferramentas computacionais que foram adotadas; e
- As categorias de impacto ambiental analisadas.

Do total de 27 estudos, a maioria adotou a abordagem convencional de ACV (15 estudos), sete empregaram ACV temporal, dois ACV espacial e três ACV espaço-temporal (Atilgan e Azapagic, 2016; Kumar et al., 2019; Zhou et al., 2022).

Com relação à modelagem, 22 estudos adotaram a abordagem atribucional e cinco empregaram a abordagem consequencial de ACV. A grande maioria dos estudos considerou a fronteira do sistema como sendo delimitada pelos processos do berço ao túmulo. Somente três estudos consideram a fronteira do berço ao portão (Barros et al., 2018; Schomberg et al., 2022; e Zhou et al., 2022).

A diversidade geográfica dos estudos revisados remete à importância de se considerar as especificidades regionais e os contextos locais ao se avaliar os impactos ambientais da geração de energia hidrelétrica. A maioria dos estudos abordou sistemas de geração de energia hidrelétrica de diversos países europeus. Quatro estudos focalizaram usinas hidrelétricas no Brasil; três na América do Norte (EUA, Canadá e México); quatro abordaram casos na Ásia (China, Índia, Paquistão e Japão); dois na África (Marrocos e Etiópia).

A base de dados mais empregada nos estudos foi a ecoinvent em diversas versões e as ferramentas computacionais de modelagem mais usadas foram Gabi, Simapro e openLCA. Já os métodos de cálculo de impacto foram ReCiPe, Midpoint ILCD e CML 2001.

O Quadro 2.2 compara os resultados gerados pelos estudos de ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica em relação aos impactos ambientais considerados.

¹ A ACV do berço ao túmulo considera todas as fases da vida do produto, desde a obtenção das matérias-primas, sua produção ou construção, uso ou operação e fim de vida, descarte ou reciclagem. Neste caso, a função do produto deve ser bem definida.

² A ACV do berço ao portão considera apenas as etapas iniciais da vida do produto, como a obtenção de matérias-primas e sua fabricação. Não considera a etapa de distribuição e demais etapas posteriores. Neste caso, a função do produto não é importante.

Quadro 2.1 – Estudos empíricos sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica

Ref.	Objetivo	Abordagem	Abrangência	Aspectos metodológicos
Ribeiro e Silva (2010)	Desenvolver um inventário do ciclo de vida que seja representativo da eletricidade hidrelétrica gerada no Brasil, com foco específico na Usina Hidrelétrica de Itaipu.	ACV convencional.	- Geográfica: Brasil. - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo, focando na quantificação dos impactos ambientais associados à Usina Hidrelétrica de Itaipu sem considerar os efeitos mais amplos no sistema como um todo. - Fase(s) da ACV: Definição do objetivo e escopo e análise de inventário do ciclo de vida. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: Não especificadas. - Fatores de caracterização dos impactos ambientais considerados: O estudo abrangeu somente o ICV e não a AICV. Os resultados da análise de inventário incluíram: fluxo de materiais; consumo de água e energia; emissões de materiais particulados; emissões de NO_x, emissões de CO₂ e CH₄; e uso da terra.
Goel et al. (2010)	Realizar uma ACV da geração de eletricidade por meio de pequenos projetos hidrelétricos, visando compreender as características desses sistemas do ponto de vista do aquecimento global.	ACV convencional.	- Geográfica: Índia (Hamirpur, Himachal Pradesh e Allahabad) - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: bases de dados locais como os fornecidos pela Central Electricity Authority. O modelo de avaliação do ciclo de vida com base na matriz insumo-produto econômica (EIO-LCA) foi a ferramenta de escolha. - Fator(es) de caracterização dos impactos: Potencial de aquecimento global (GWP).
Raadal et al. (2011)	Fornecer uma visão abrangente das emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo do ciclo de vida da geração de energia hidrelétrica e eólica.	ACV convencional.	- Geográfica: Países nórdicos, Japão e Brasil. - Fonte(s) energética(s): <u>Hidrelétrica</u> e eólica.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteiras do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: ecoinvent (hidrelétrica eólica) e Vestas Wind System A/S (eólica). - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de Aquecimento Global (GWP).
Pascale et al. (2011)	Realizar uma ACV de um sistema hidroelétrico comunitário de 3 kW localizado na vila de Huai Kra Thing, na Tailândia rural.	ACV convencional.	- Geográfica: Tailândia. - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: ACV do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: Bse de dados GaBi 4; <i>software</i> de modelagem GaBi 4; não especifica qual método de cálculo de impacto. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); e potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de depleção de ozônio (ODP) e potencial de depleção abiótica (ADP).
Santoyo-Castelazo et al. (2011)	Estimar os impactos ambientais do ciclo de vida da geração de eletricidade pelo setor público no México.	ACV convencional.	- Geográfica: México - Fonte(s) energética(s): <u>Hidroelétrica</u>, geotérmica, eólica, nuclear, carvão; gás natural	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas ecoinvent; Global Emission Model for Integrated Systems (GEMIS) database; GaBi e CML 2001. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP), potencial de acidificação (AP), potencial de eutrofização (EP), depleção de ozônio; e potencial de toxicidade humana (HTP), entre outros.

Quadro 2.1 – Estudos empíricos sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica (cont.)

Ref.	Objetivo	Abordagem	Abrangência	Aspectos metodológicos
DOE. NREL (2012)	Identificar e analisar os impactos ambientais e econômicos associados à geração de energia hidrelétrica.	ACV convencional.	- Geográfica: EUA. - Fonte(s) energética(s): Hidroelétrica	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: Não foram mencionadas no documento. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de ocupação da terra (LOP); potencial de consumo de água (WCP); outras emissões de poluentes do ar, emissões de mercúrio, amônia, material particulado etc. (tabela 4-5)
Flury e Frischknecht (2012)	Realizar inventários do ciclo de vida da geração de energia hidrelétrica para analisar e quantificar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica.	ACV convencional.	- Geográfica: Suíça; regiões alpinas e não alpinas da Europa. - Fonte(s) energética(s): Hidroelétrica.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Definição de objetivo e escopo e análise de inventário do ciclo de vida. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: ecoinvent v2.2 e EcoSpold v1 data format. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: O estudo abrangeu somente o ICV e não a AICV. Os resultados da análise de inventário incluíram uso da terra; capacidade útil dos reservatórios; uso e consumo de água; uso de óleo lubrificante; emissões de gases de efeito estufa.
Messagie et al. (2014)	Calcular a pegada de carbono horária da produção de eletricidade na Bélgica em 2011, considerando as emissões do ciclo de vida, a fim de fornecer uma perspectiva sistêmica e evitar a transferência de ônus.	ACV temporal	- Geográfica: Bélgica - Fonte(s) energética(s): Nuclear, carvão, eólica, solar, <u>hidrelétrica</u>, gás natural, gás de alto-forno e biomassa (madeira e resíduos municipais).	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: ecoinvent, ReCiPe 2008. Não foi mencionado o <i>software</i> de modelagem que foi usado no estudo de ACV. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP), considerando emissões de CO₂, NO_x e SO₂
Turconi et al. (2014)	Avaliar o impacto ambiental de um futuro sistema elétrico de baixo carbono na Dinamarca para o ano de 2030, comparando-o com a situação atual em 2010 e um cenário alternativo para 2030, utilizando ACV consequencial.	ACV temporal	- Geográfica: Dinamarca - Fonte(s) energética(s): Eólica, <u>hidroelétrica</u> e usinas termelétricas.	- Modelagem da ACV: Consequencial - Fronteira do sistema: ACV do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Considera resoluções temporais, compreendendo a situação de base em 2010, um cenário futuro para 2030 e um cenário alternativo de continuidade dos negócios para 2030. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: ecoinvent e EASETECH Energy (modelo específico de ACV para sistemas de energia desenvolvido na Technical University of Denmark). - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP), potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de ocupação da terra (LOP); potencial de consumo de água (WCP); potencial de toxicidade humana (HTP) (efeitos cancerígenos e não cancerígenos), potencial ecotoxicidade, depleção de recursos fósseis e potencial de depleção abiótica (ADP).

Quadro 2.1 – Estudos empíricos sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica (cont.)

Ref.	Objetivo	Abordagem	Abrangência	Aspectos metodológicos
Pang et al. (2015)	Realizar uma ACV de uma pequena usina hidrelétrica na China e comparar o desempenho ambiental dessa usina com o de outras usinas hidrelétricas no mundo.	ACV convencional.	- Geográfica: China (Província de Guizhou) - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: ecoinvent 2.2; plataforma Gabi 6 para modelagem e CML 2001 para o cálculo dos impactos ambientais. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de depleção abiótica (ADP); potencial de acidificação (AP); potencial de ecotoxicidade aquática (FETP); potencial de toxicidade humana (HTP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP)
Atilgan e Azapagic (2016)	Estimar os impactos ambientais do ciclo de vida da geração de eletricidade a partir de fontes de energia renovável na Turquia.	ACV espaço-temporal	- Geográfica: Turquia - Fonte(s) energética(s): <u>Hidrelétrica</u>; energia eólica <i>onshore</i>; e energia geotérmica	- Modelagem da ACV: Consequencial. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Considera parâmetros temporais de curto e longo prazo na ACV para capturar a natureza dinâmica dos impactos ambientais ao longo do tempo. Resolução temporal foi anual. - Condições espaciais incluíram a localização geográfica das usinas de energia, locais de extração de recursos, condições climáticas e rotas de transporte. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: bases ecoinvent e ESU Database para ICV; GaBi v.6 para modelagem dos sistemas; e o método CML 2001 para quantificar os impactos ambientais. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de ecotoxicidade terrestre (TETP); potencial de formação de ozônio (POCP).
Lelek et al. (2016)	Determinar e comparar o impacto da produção e fornecimento de eletricidade e calor a um usuário final no meio ambiente na Polônia nos anos de 2007, 2010 e 2012	ACV convencional.	- Geográfica: Polônia. - Fonte(s) energética(s): <u>Hidrelétrica</u>, carvão, gás natural, eólica, solar e biomassa.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: ecoinvent para coletar dados de inventário específicos para a Polónia e Impact2002+ para quantificar impactos ambientais. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados Potencial de aquecimento global (GWP), potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de ocupação da terra (LOP); potencial de consumo de água (WCP); potencial de ecotoxicidade terrestre (TETP); e depleção de recursos minerais.
Geller e Meneses (2016)	Investigar os impactos ambientais da construção, operação e descomissionamento de uma estação de energia hidrelétrica com base na ACV.	ACV convencional.	- Geográfica: Brasil. - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo, focando na quantificação dos impactos ambientais associados à Usina Hidrelétrica Curuá-Uma, no estado do Pará. - Fase(s) da ACV: Todas - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas ecoinvent, coleta de dados localmente e CML 2001. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de depleção abiótica (ADP); potencial de acidificação (AP); potencial de ecotoxicidade aquática (FETP); e potencial de toxicidade humana (HTP).

Quadro 2.1 – Estudos empíricos sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica (cont.)

Ref.	Objetivo	Abordagem	Abrangência	Aspectos metodológicos
Akber et al. (2017)	Avaliar a sustentabilidade do setor elétrico no Paquistão em termos de impactos econômicos, ambientais e sociopolíticos de várias fontes de geração de energia elétrica, aplicando a abordagem de ciclo de vida	ACV convencional.	- Geográfica: Paquistão - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica, óleo, gás, carvão, nuclear, eólica e biomassa (bagaço).	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas: ecoinvent v3.2 e SimaPro 8.2.3. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de ocupação da terra (LOP); potencial de consumo de água (WC); potencial de depleção abiótica (ADP); potencial de toxicidade humana (HTP); potencial de ecotoxicidade aquática (FETP); potencial de ecotoxicidade marinha (METP); potencial de ecotoxicidade terrestre (TETP).
Briones Hidrovo et al. (2017)	Avaliar o desempenho ambiental de duas usinas hidrelétricas no Equador, especialmente em relação às emissões de gases de efeito estufa ao longo de seus ciclos de vida.	ACV espacial	- Geográfica: Equador. - Fonte(s) energética(s): Hidroelétrica.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: Bases de dados locais; <i>software</i> de modelagem Simapro; e ReCiPe para cálculo dos impactos. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de depleção do ozônio (ODP); potencial de acidificação terrestre (TAP); potencial de eutrofização de água doce (FEP); potencial de ecotoxicidade aquática (FETP); potencial de ecotoxicidade terrestre (TETP); potencial de ocupação da terra (LOP); potencial de combustíveis fósseis (FFP); potencial excedente de minérios (SOP); potencial de consumo de água (WCP).
Siddiqui et Dincer (2017)	Analisar, avaliar e comparar os impactos ambientais da geração de energia nuclear, eólica e hidroelétrica na província de Ontário, Canadá, por meio de uma abordagem abrangente de avaliação do ciclo de vida	ACV convencional.	- Geográfica: Canadá. - Fonte(s) energética(s): Hidroelétrica, nuclear e eólica.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: ACV do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas CML 2001 - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de depleção abiótica (ADP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de toxicidade humana (HTP).
Barros et al. (2018)	Avaliar o desempenho ambiental passado e futuro da geração de eletricidade no Brasil em termos do potencial de aquecimento global (GWP) e potencial de temperatura global (GTP), utilizando a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).	ACV temporal	- Geográfica: Brasil - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica, energia eólica, energia solar, gás natural, carvão e biomassa	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: ACV do berço ao portão. - Fase(s) da ACV: Todas. - Base de dados e ferramentas computacionais empregadas ecoinvent v3.3 e Umberto NXT Universal. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de temperatura global (GTP). Não há menção específica sobre a consideração de outros fatores de caracterização de impactos ambientais.

Quadro 2.1 – Estudos empíricos sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica (cont.)

Ref.	Objetivo	Abordagem	Abrangência	Aspectos metodológicos
Vuarnoz e Jusselme (2018)	Avaliar as variações temporais no uso de energia primária e nas emissões de gases de efeito estufa associadas à eletricidade fornecida pela rede suíça e seus países vizinhos.	ACV temporal.	- Geográfica: Suíça, França, Alemanha e Áustria. - Fonte(s) energética(s): hidrelétrica, nuclear, combustíveis fósseis, eólica, solar e outras fontes como lixo e óleo para a Áustria, resíduos, bioenergia e solar para a Suíça, e resíduos municipais para a França.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: ACV do berço ao túmulo. - Considera resoluções temporais horárias para a avaliação, analisando os dados em intervalos de uma hora ao longo de um período de um ano. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas ecoinvent e SimaPro. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de ocupação da terra (LOP); potencial de consumo de água (PWC).
Kumar et al. (2019)	Prever o risco de gases de efeito estufa (GEE) de longo prazo para reservatórios de hidrelétricas chinesas e suas emissões associadas ao ciclo de vida.	ACV espaço-temporal.	- Geográfica: China - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica	- Modelagem da ACV: Consequencial. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas Ferramenta de Avaliação de Risco de Gases de Efeito Estufa (GRAT) - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP).
Mahmud et al. (2019)	Realizar uma avaliação estratégica do impacto de usinas hidrelétricas em áreas alpinas e não alpinas da Europa, segundo a abordagem convencional de ACV.	ACV convencional.	- Geográfica: Regiões alpinas e não alpinas da Europa. - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: ecoinvent, ReCiPe 2016, Impact 2002+. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de ocupação da terra (LOP); e potencial de consumo de água (WCP).
Kabayo et al. (2019)	Realizar uma avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal, abordando tanto os impactos ambientais, quanto os impactos socioeconômicos.	ACV temporal.	- Geográfica: Portugal - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica, térmica a carvão, térmica a gás natural, eólica e solar fotovoltaica.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: ecoinvent, Simapro v8.0 para modelagem; ReCiPe 2016; Usetox 1.04 para impactos referentes à toxicidade e AWARE para cálculo de escassez de água doce. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de ocupação da terra (LOP); potencial de consumo de água (WCP); depleção de recursos naturais; potencial de ecotoxicidade aquática (FETP); potencial de ecotoxicidade terrestre (TEPT).
Teffera et al. (2020)	Estimar os impactos ambientais médios da geração de energia hidrelétrica na Etiópia, analisando onze sistemas de geração de energia hidrelétrica, que representam cerca de 96% da eletricidade fornecida à rede central.	ACV temporal.	- Geográfica: Etiópia - Fonte(s) energética(s): Hidrelétrica	- Modelagem da ACV: Consequencial. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas ecoinvent v3.01, banco de dados local da Ethiopian Electric Power (EEP), Simapro v8.0.3.14 e ReCiPe 2008. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de consumo de água (WCP); potencial de depleção de fósseis (FD); potencial de depleção de metais (MD); potencial de toxicidade humana (HT); potencial de ecotoxicidade terrestre (TEP); potencial de ecotoxicidade aquática (FETP); potencial de ecotoxicidade marinha (MEP); potencial de radiação ionizante (IRP); potencial de ocupação de terra agrícola (LOPa); Potencial de ocupação de terra urbana (ULOU); transformação de terra natural (NLT).

Quadro 2.1 – Estudos empíricos sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica (cont.)

Ref.	Objetivo	Abordagem	Abrangência	Aspectos metodológicos
Cusenza et al. (2020)	O estudo visa quantificar a contribuição potencial do futuro mix de geração de eletricidade na Sicília para alcançar as metas energéticas e climáticas da União Europeia, adotando ACV temporal.	ACV temporal	- Geográfica: Itália. - Fonte(s) energética(s): <u>Hidrelétrica</u>, fotovoltaica, eólica, usinas de cogeração usinas térmicas utilizando gás natural, combustíveis fósseis e bioenergia.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas ecoinvent v3.01 e Midpoint ILCD 2011. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de depleção abiótica (ADP).
San Miguel e Cerrato (2020)	Avaliar a sustentabilidade do sistema elétrico da Espanha com base na ACV, incluindo uma investigação de dados históricos desde 1990 e projeções futuras para 2030 e 2050.	ACV convencional	- Geográfica: Espanha - Fonte(s) energética(s): <u>Hidrelétrica</u>; nuclear; carvão; gás natural; solar; eólica e biomassa.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas ecoinvent v3.1; ILCD 2011 Midpoint+ e ReCiPe 2016. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); uso e transformação da terra (LU); potencial de consumo de água (WCP); potencial de toxicidade humana (HTP); potencial de combustíveis fósseis (FFP).
Schomberg et al. (2022)	Realizar uma ACV espacialmente explícita de diferentes sistemas de geração de eletricidade para avaliar seus impactos ambientais.	ACV espacial	- Geográfica: Alemanha, Marrocos e Brasil - Fonte(s) energética(s): <u>hidrelétrica</u>, energia solar concentrada, biomassa e carvão.	- Modelagem da ACV: Consequencial - Fronteira do sistema: Do berço ao portão. - Fase(s) da ACV: Todas. - Os parâmetros espaciais considerados nesta ACV incluíram as cadeias de abastecimento a montante regionalizadas para <i>commodities</i> minerais-chave relevantes para os sistemas de geração de eletricidade em questão. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas ecoinvent, openLCA e ReCiPe Endpoint (H, A). - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: expressos como pegada climática, pegada energética, pegada de terra, pegada de material e pegada hídrica, entre outras.
Zhu et al. (2022)	Analisar as intensidades de GEE de diferentes tipos de geração de energia na China, mediante um inventário do ciclo de vida da geração de eletricidade do país em escalas espaciais e temporais, sob diferentes cenários.	ACV espaço-temporal	- Geográfica: China - Fonte(s) energética(s): Eólica, energia solar fotovoltaica, energia nuclear, <u>hidrelétrica</u>, energia de biomassa e energia térmica	- Modelagem da ACV: Atribucional, apesar de ter desenvolvido o estudo segundo a abordagem espaço-temporal. - Fronteira do sistema: Do berço ao portão, incluindo as etapas de construção de infraestrutura, fornecimento de combustível e geração de energia. - Fase(s) da ACV: Inventário do ciclo de vida. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas Ecoinvent v3.7; openLCA. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); e potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP).
UNECE (2022)	Realizar avaliação comparativa dos impactos ambientais das tecnologias de geração de eletricidade por meio da ACV.	ACV convencional	- Geográfica: União Europeia. - Fonte(s) energética(s): Carvão, gás natural, eólica, solar (fotovoltaica e concentrada), <u>hidrelétrica</u> e nuclear.	- Modelagem da ACV: Atribucional. - Fronteira do sistema: Do berço ao túmulo. - Fase(s) da ACV: Todas. - Bases de dados e ferramentas computacionais empregadas: ecoinvent e MATLAB software. - Fator(es) de caracterização dos impactos ambientais considerados: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de eutrofização de água doce (FER); potencial de radiação ionizante (IRP); potencial de toxicidade humana (HTP); potencial de ocupação da terra (LOP); potencial de consumo de água (WCP); potencial de combustíveis fósseis (FFP); e resultados adicionais específicos para a região da União Europeia.

Quadro 2.2 – Resultados dos estudos referentes à avaliação dos impactos do ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica

Ref.	Categoria	Vida útil (anos)	Impactos ambientais					
			GWP	AP	EP	POCP	LU	WC
Goel et al. (2010)	UHE com reservatório (1000 kW – 30.000 kW)	20 - 35	11,91–31,2 E-03 kg CO ₂ -eq/MWh	-	-	-	-	-
	PCH fio d'água (250 – 1000 kW)		32,23–35,35 E-03 kg CO ₂ -eq/MWh					
Raadal et al. (2011) ³	UHE com reservatório	50 -100	4,2–152 E-06 kg CO ₂ -eq/MWh 0,2 a 11,2 E0-6 kg CO ₂ -eq/MWh (excluídas as emissões provenientes de terras inundadas)	-	-	-	-	-
	UHE a fio d'água		0,3 - 13 E0-6 kg CO ₂ -eq/MWh					
Pascale et al. (2011)	UHE a fio d'água (3 kW)	20	52,7 E0-6 kg CO ₂ -eq/MWh	-	0,030 E0-6 kg PO ₂ -eq/MWh	0,030 E-06 kg eteno-eq/MWh	-	-
Santoyo-Castelazo et al. (2011) ⁴	UHE com reservatório	1 (apre-senta o valor anual)	3.49E+08 kg CO ₂ eq/ano	4.67E+05 kg SO ₂ eq/ano	7.57E+04 kg PO ₄ eq/ano	1.07E+05 kg eteno-eq/ano	-	-
DOE. NREL (2012)	UHE com reservatório (2.080 MW)	80	43,8E0-3 kg CO ₂ -eq/MWh	-	-	-	0,91 – 1,8 m ² /MWh	73,27 m ³ /MWh
Pang et al. (2015)	PCH com reservatório (cerca de 4 MW)	30	28,4 kg CO ₂ -eq/MWh	109,2 E0-3 kg SO ₂ -eq/MWh	-	9,3 E0-3 kg C ₂ H ₄ -eq/MWh	-	-

³ Considera 39 estudos de ACV de hidrelétricas para definir os valores de variação de emissões de GEE apresentadas no estudo.

⁴ Não considera uma UHE específica; apresenta o resultado genérico para a UHE na matriz elétrica do país considerado no estudo. Não considerado na comparação.

Quadro 2.2 – Resultados dos estudos referentes à avaliação dos impactos do ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica

Ref.	Categoria	Vida útil (anos)	Impactos ambientais referentes aos fatores de caracterização					
			GWP	AP	EP	POCP	LOP	WCP
Atilgan e Azapagic (2016)	UHE com reservatório (175,6 MW)	150	8,3 kg CO ₂ -eq/MWh	0,3 E0-3 kg SO ₂ -eq/MWh	0,012 kg PO ₄ -eq/MWh	0,0021 kg C ₂ H ₄ -eq/MWh	-	-
	UHE com reservatório (95 MW)	150	4,2 kg CO ₂ -eq/MWh	0,7 E0-3 kg SO ₂ -eq/MWh	0,028 kg PO ₄ -eq/MWh	0,0012 kg C ₂ H ₄ -eq/MWh	-	-
	UHE a fio d'água (13,5 MW)	80	4,1 kg CO ₂ -eq/MWh	0, 150 SO ₂ -eq/MWh	0,063 kg PO ₄ -eq/MWh	0,0021 kg C ₂ H ₄ -eq/MWh	-	-
Geller e Meneses (2016)	PCH (30 MW)	100	5,4659 kg CO ₂ -eq /MWh	0,0223 kg SO ₂ eq/MWh	-	-	-	-
Briones Hidrovo et al. (2017)	UHE com reservatório	100	547 kg CO ₂ -eq/MWh	-	-	-	-	-
	UHE a fio d'água	80	2,6 kg CO ₂ -eq/MWh	-	-	-	-	-
Akber et al. (2017)	UHE com reservatório (42 MW)	150	12.83 kg CO ₂ -eq/MWh	41,73 E0-6 kg SO ₂ -eq/MWh	14.81 E0-6 kg PO ₄ -eq/MWh	2,79 E0-6 kg C ₂ H ₄ eq/MWh	-	-
	UHE a fio d'água (21 MW)	80	8.78 kg CO ₂ -eq/MWh	35,46 E0-6vkg SO ₂ -eq/MWh	13,90 E0-6 kg PO ₄ -eq/MWh	2,42 E0-6 kg C ₂ H ₄ eq/MWh	-	-
Siddiqui e Dincer (2017)	UHE (1.499 MW) ⁵	100	2,7 - 15,2 kg CO ₂ -eq/MWh	Cerca de 0,01 kg SO ₂ -eq/MWh	Cerca de kg 0,0005 PO ₄ -eq/MWh	0,000768 kg Eteno-eq/MWh	-	-
Barros et al. (2018)	UHE com reservatório ⁶	100	73,78 kg CO ₂ -eq/MWh	-	-	-	-	-
Kumar et al. (2019)	UHE com reservatório ⁷	100	0.06 - 0.09 kgCO ₂ -eq/MWh	-	-	-	-	-

⁵ O estudo apresenta UHE com e sem decomposição de biomassa. Os valores menores representam os impactos da UHE sem decomposição de biomassa.

⁶ Considera o processo no ecoinvent de nome *electricity production, hydro, reservoir, tropical region [BR]*.

⁷ Não explicita a capacidade instalada das usinas consideradas.

Quadro 2.2 – Resultados dos estudos referentes à avaliação dos impactos do ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica

Ref.	Categoria de hidrelétrica	Vida útil (anos)	Impactos ambientais referentes aos fatores de caracterização					
			GWP	AP	EP	POCP	LOP	WCP
Mahmud et al. (2019)	UHE com reservatório (0.5–1200 MW)	100	1,07 E-01 – 1,41 kg CO ₂ -eq/MWh	-	-	-	-	-
Kabayo et al. (2019)	UHE com reservatório (96 MW)	150	14 kg CO ₂ -eq/MWh	0,06 kg SO ₂ -eq/MWh	1E-03 kg PO ₄ -eq/MWh	-	-	615,6 mundo.m ³ /MWh
	UHE a fio d'água (8.6 MW)	80	4 kg CO ₂ -eq/MWh	0,04 kg SO ₂ -eq/MWh	1E-03 kg PO ₄ -eq/MWh	-	-	0,6 mundo.m ³ /MWh
Tefferet et al. (2020) ⁸	UHE (25-100 MW)	100	62,59 kg CO ₂ -eq/MWh	0,08 kg SO ₂ -eq/MWh	-	-	3,79 m ² /MWh	2992,75 m ³ /MWh
	UHE (acima de 100 MW)		30,70 kg CO ₂ -eq/MWh	0,02 kg SO ₂ -eq/MWh	-	-	0,69 m ² /MWh	1453,38 m ³ /MWh
Schomberg et al. (2022)	UHE a fio d'água (7-10 MW)	80	11,8 kg CO ₂ -eq/MWh	-	-	-	4,68E-01 m ² a/MWh	15,8 m ³ /MWh
Zhu et al. (2022)	UHE convencional ⁹	50	4.0 kg CO ₂ -eq/MWh	-	-	-	-	-
UNECE (2022)	UHE (660MW)	80	-	-	7,2 - 13 E0-3 kg P eq/MWh	-	8,7 – 15,2 m ² /MWh	0,2 – 0,4 m ³ /MWh
	UHE (360 MW)		6,1 - 11 kg CO ₂ eq/MWh	-	0,76 – 1,3 E0-3 kg P eq/MWh	-	24,07 – 41,95 m ² /MWh	0,022 – 0,039 m ³ /MWh

Legenda: Fatores de caracterização dos impactos ambientais: Potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (AP); potencial de eutrofização (EP); potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP); potencial de ocupação da terra (LOP); potencial de consumo de água (WCP).

Categoria: Usinas hidrelétricas de energia (UHE); pequenas centrais hidrelétricas (PCH).

⁸ O estudo utilizou usinas a fio d'água e de reservatório, de médio (25-100 MW) e grande porte (acima de 100 MW).

⁹ Não explicitada a capacidade instalada da usina.

Esses estudos abrangeram usinas hidrelétricas classificadas pela potência, categorizadas como pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e usinas hidrelétricas de energia (UHE) e pelo tipo de reservatório, ou seja, de acumulação ou a fio d'água. Os impactos considerados para fins da análise comparativa dos estudos de ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica foram: (i) potencial de aquecimento global (GWP), medido pela quantidade de gases de efeito estufa emitidos, expressos em equivalentes de dióxido de carbono ($\text{CO}_2\text{-eq}$); (ii) potencial de acidificação (AP), calculado pela contribuição das emissões para a acidificação ambiental, expressa em equivalentes de dióxido de enxofre ($\text{SO}_2\text{-eq}$); (iii) potencial de eutrofização (EP), avaliado pela contribuição das emissões para o enriquecimento de nutrientes em corpos d'água, levando à eutrofização, expressa em equivalentes de fosfato ($\text{PO}_4\text{-eq}$); (iv) potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP), medido pela contribuição das emissões para a formação de ozônio troposférico, expressa em equivalentes de etileno ($\text{C}_2\text{H}_4\text{-eq}$); (v) potencial de ocupação da terra (LOP), expresso pela área de terra necessária para suportar o ciclo de vida da usina hidrelétrica, expressa em metros quadrados (m^2); (vi) potencial de consumo de água (WCP), medido pela quantidade de água consumida durante o ciclo de vida do sistema, expressa em litros (L) ou em m^3 .

Devido às diferenças inerentes que caracterizam as usinas analisadas, bem como às diversas abordagens utilizadas (por exemplo, considerar ou não a evaporação da água do reservatório e a energia potencial contida na água), observou-se uma alta variabilidade em todos os indicadores ambientais considerados. Estimativas do potencial de aquecimento global (GWP) variaram na faixa de $1,07\text{E-}01$ a $547 \text{ kg CO}_2\text{-eq/MWh}$ e os cálculos referentes ao potencial de ocupação da terra (LOP) variaram de $0,468$ a $41,95 \text{ m}^2/\text{MWh}$. Em particular, os valores de potencial de acidificação (AP) variaram de $35,46\text{E-}06$ a $0,08 \text{ kg SO}_2\text{-eq/MWh}$, os valores de potencial de eutrofização (EP) variaram de $13,90\text{E-}06$ a $0,063 \text{ kg PO}_4\text{-eq/MWh}$ e os valores do potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP) variaram de $0,030\text{E-}06$ a $0,0021 \text{ kg C}_2\text{H}_4\text{-eq/MWh}$. Já os resultados referentes ao potencial de consumo de água (WCP) variaram de $2992,75$ a $0,022 \text{ m}^3/\text{MWh}$. A maioria dos estudos apresentaram os resultados totais e por fase do ciclo de vida. Vale destacar que alguns estudos identificados no Quadro 2.1 apresentam resultados de impactos de ciclo de vida para toda a matriz elétrica de uma região ou país, de forma que não consideram os resultados

em separado para usinas hidrelétricas. Por esta razão, seus resultados não foram apresentados no Quadro 2.2.

Não obstante, os avanços da pesquisa em relação à inclusão conjunta de considerações espaciais e temporais no enquadramento conceitual da ACV, buscou-se identificar neste capítulo as abordagens metodológicas de ACV espacial, temporal e espaço-temporal que estão sendo propostas até o momento. Observou-se que a inclusão de considerações espaço-temporais combinadas na avaliação de ciclo de vida de um determinado produto constitui hoje uma área de fronteira do conhecimento sobre ACV em geral.

Na perspectiva metodológica, a análise de 27 estudos empíricos sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica, publicados no período de 2010 a 2024, revelou a necessidade de diretrizes e *frameworks* analíticos consistentes para modelar as emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais de usinas hidrelétricas segundo uma abordagem espaço-temporal. Mostrou também a importância de se considerar a incerteza associada a fatores como a capacidade de geração instalada por unidade de área inundada e a variação sazonal hidrogeológica. Esses fatores podem ter um impacto significativo nos resultados da avaliação do ciclo de vida, especialmente em relação à intensidade das emissões de gases de efeito estufa associadas à energia hidrelétrica.

Outro ponto de destaque nos estudos empíricos de ACV de usinas hidrelétricas é a necessidade de normalizar os impactos ambientais para a unidade funcional, permitindo uma avaliação mais precisa da intensidade dos impactos associados à geração de energia hidrelétrica, considerando variações espaciais e temporais e a incerteza na capacidade de geração e vida útil das usinas.

Em suma, o desenvolvimento de um novo modelo de avaliação do ciclo de vida espaço-temporal é fundamental para abordar de maneira precisa as emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais associados à geração de energia hidrelétrica. Tal modelo permitirá enfrentar as incertezas relacionadas à capacidade de geração e à quantificação propriamente dita dos impactos, fornecendo diretrizes robustas e um framework analítico consistente. Este avanço é crucial para aprimorar a precisão das avaliações e consolidar a abordagem espaço-temporal como uma área emergente e essencial no campo da ACV.

3

Identificação e análise de bases de dados e ferramentas computacionais de ACV

Neste capítulo, apresenta-se inicialmente a base de dados ecoinvent v3.10, escolhida como a principal fonte de dados para a fase aplicada desta pesquisa. Na sequência, com base nos resultados da revisão da literatura apresentada no capítulo anterior, descrevem-se de forma sucinta as características e funcionalidades de ferramentas computacionais de modelagem e métodos de avaliação de impactos no ciclo de vida (AICV), empregados nos estudos prévios abordados na referida revisão. A partir de uma análise comparativa das ferramentas abordadas nas seções 3.2 e 3.3, respectivamente, justificam-se as escolhas do *software* openLCA v.1.9 para a modelagem da ACV espaço-temporal (Ciroth et al., 2019) e o método ReCiPe2016 para a análise dos impactos ambientais (Huijbregts et al., 2017; RIVM, 2017).

3.1.

Base de dados ecoinvent v3.10

A base de dados ecoinvent v3.10 consiste em um conjunto de dados de inventários de ciclo de vida (ICV), que representam processos unitários individuais de atividades humanas e suas trocas com o meio ambiente. Mais de 20.000 processos unitários cobrindo cerca de 3.500 produtos distintos em todos os setores econômicos estão incluídos em sua última versão. Informações detalhadas sobre processos unitários, inventários cumulativos do ciclo de vida (ICV) e avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) da base de dados ecoinvent v3 encontram-se em Weidema et al. (2013). Em publicação mais recente de FitzGerald et al. (2023), encontram-se documentadas as mudanças implementadas na versão 3.10 desta base.

Como as atividades são ligadas entre si para capturar o fluxo de materiais e energia dentro dos sistemas, a base ecoinvent v3.10 fornece uma lista de todos os conjuntos de dados disponíveis para processos específicos, que podem ser

buscados pelo nome da atividade ou usando o sistema de classificação industrial das Nações Unidas, denominado *International Standard Industrial Classification of All Economic Activities* (ISIC). Além disso, cada conjunto de dados é atribuído a um ou mais setores (por exemplo, eletricidade, madeira, transporte, etc.), o que permite identificar facilmente processos que pertencem ao mesmo setor. Os conjuntos de dados também podem ser pesquisados com base no(s) produto(s) que geram, seja usando o nome do produto ou com base na Classificação Central de Produtos (sigla em inglês, CPC) do produto.

O ponto central da base ecoinvent v3.10 está na compilação dos blocos básicos, que representam os processos unitários individuais (UPRs) das atividades humanas e suas trocas com o meio ambiente, e na combinação desses UPRs em cadeias de suprimento para formar inventários de ciclo de vida (ICV). No entanto, a base de dados também contém dados sobre pontuações de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), que são calculadas aplicando métodos de AICV já desenvolvidos (como, por exemplo, ReCiPe2016 ou IMPACT World+).

Especificamente com relação à AICV, a base fornece uma lista de todos os indicadores dos métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) que abriga, para os quais pontuações de impacto são calculadas. As versões dos métodos são fornecidas, bem como informações sobre onde encontrar a documentação e a fonte original dos fatores de caracterização dos diferentes métodos. Assim, para cada conjunto de dados na base ecoinvent v3.10, encontram-se disponíveis pontuações de avaliação de impacto do ciclo de vida para vários métodos AICV e categorias de impacto correspondentes, como ‘mudanças climáticas’, ‘toxicidade humana’, ‘consumo de água’ ou ‘uso da terra’.

A estrutura da base de dados permite aos usuários rastrear os impactos dos produtos selecionados ao longo de suas cadeias de suprimento e entender seus resultados. Além disso, ela concede flexibilidade, pois permite diferentes usos dos dados, dependendo das necessidades dos usuários. Além da AICV para produtos individuais, os usuários também podem se interessar, por exemplo, por perfis de emissão, listas de materiais, fluxos de material, massa, dentre outros.

A base de dados ecoinvent v3.10, com sua estrutura modular que fornece dados brutos de processo unitário de múltiplos produtos, é adequada para apoiar ambos os tipos de modelagem de sistema (consequencial e atribucional). A nova versão manteve os modelos “Sistema de Processo” (*System Process* – S) e

“Unidade de Processo” (*Unit Process* – U), bem como as abordagens “Atribucional” e “Consequencial”. Ou seja, nesta versão existem inventários “System Process” e “Unit Process” atribucionais (identificados como “APOS” ou “cut-off”) e consequenciais (identificados como “*Conseq*”). Além disso, nesta versão, foram criadas novas classificações para os inventários: *Transformation* e *Market*.

Com relação às localizações geográficas dos processos unitários, na base ecoinvent v3.10 elas são chamadas de “geografias” e seguem a Norma ISO 3166-1 alpha-2 para designar a geografia do inventário: (i) duas letras para designar um país (ex.: BR = Brasil; CH = Suíça); e três ou mais letras para designar uma região/continente (ex.: RER = Europa; NORDEL = Associação Energética dos Países Nórdicos; UCTE = União para a Coordenação da Transmissão de Eletricidade). O objetivo da ecoinvent v3.10 é cobrir atividades nas geografias mais relevantes para o produto ou serviço selecionado, sendo que os processos unitários representam as condições médias de produção dentro de uma localização geográfica, em vez de condições específicas da empresa ou do local.

Particularmente em relação ao setor de energia, incluindo a geração de energia hidrelétrica, a base ecoinvent v3.10 atualizou os mix de mercado de eletricidade para refletir a situação em 2020. Nos casos específicos do Brasil, China, EUA, Canadá e Suíça, os mix de eletricidade são atualizados para refletir a situação em 2021. Todos os casos específicos são baseados em estatísticas nacionais, enquanto os países restantes são baseados em estatísticas globais. Além de correções adicionais menores, esforços de harmonização foram realizados para atualizar a documentação e as informações meta de mercados de eletricidade, conjuntos de dados de transformação e importação.

3.2.

Ferramentas para a modelagem da ACV espaço-temporal

A partir dos resultados da revisão da literatura apresentada no capítulo anterior, identificou-se que os *softwares* de modelagem OpenLCA, SimaPro, GaBi e Umberto NXT, em diferentes versões, foram os empregados nos diversos estudos sobre ACV contemplados na revisão da literatura.

Em síntese, essas ferramentas têm como objetivo principal estruturar a avaliação de impactos ambientais e a interpretação dos resultados, além de

facilitar a realização dos cálculos de balanço de massa e energia, realizar comparações entre ciclo de vida de produtos e analisar o fluxo de materiais e energia. Embora todos os quatro *softwares* sejam amplamente utilizados em estudos de ACV, suas diferenças residem principalmente em termos de licenciamento, funcionalidades específicas e foco setorial.

O Quadro 3.1, a seguir, sintetiza as principais características das referidas ferramentas de modelagem para estudos de ACV, que fundamentaram a escolha do *software* openLCA v.1.9 para o estudo de ACV espaço-temporal objeto desta dissertação.

Quadro 3.1 - Principais características dos *softwares* de modelagem adotados em estudos de ACV

Software	Licenciamento	Funcionalidades específicas	Focos de aplicação
OpenLCA v.1.9 (Ciroth et al., 2019)	<i>Open source</i> (gratuito e de código aberto), com opção de adquirir suporte técnico.	Oferece uma ampla gama de funcionalidades para modelagem de inventários de ciclo de vida, avaliação de impacto e interpretação de resultados. É altamente personalizável e possui uma comunidade ativa de usuários que contribuem com bibliotecas de dados e extensões.	Pode ser aplicado em diversos setores, desde produtos manufaturados até sistemas de geração e armazenamento de energia, construção e transporte.
SimaPro 9.1.1 Perchenart e Roquesalane (2014)	Comercial, com diferentes pacotes disponíveis dependendo das necessidades do usuário.	Conhecido pela sua interface amigável e pela extensa biblioteca de dados disponível para análise de ciclo de vida. Oferece ferramentas avançadas para modelagem e análise de impacto ambiental.	Amplamente utilizado em diversos setores, incluindo alimentos, produtos químicos, energia, transporte e eletrônicos.
GaBi 10.6.1 (Sphera, 2022)	Comercial, com diferentes opções de licença para empresas e instituições acadêmicas.	Oferece uma abordagem integrada para análise de ciclo de vida, incluindo modelagem de inventário, avaliação de impacto e interpretação de resultados.	Pode ser aplicado em diversos setores, com destaque para a indústria química, automotiva e de construção, bem como para o setor de energia.
Umberto LCA+ (ifu Hamburg GmbH, 2017)	Comercial, com diferentes opções de licença para empresas e instituições acadêmicas.	É especializado em modelagem de processos industriais e sistemas de produção. Oferece ferramentas avançadas para análise de eficiência e otimização de processos.	Principalmente utilizado em setores industriais, como química, petroquímica, alimentos, papel e celulose, entre outros.

Como resultado da análise comparativa dos quatro *softwares* profissionais de modelagem e gestão de dados para estudos de ACV, a escolha do *software* openLCA pode ser justificada pelas seguintes razões:

- Trata-se de uma ferramenta de código aberto e gratuita, sendo recomendada pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) para a troca de dados com a plataforma do Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (IBICT/ SICV Brasil, 2024);

- Por ser de código aberto e gratuito, significa que qualquer pessoa pode acessar e modificar o código-fonte. Isso pode ser vantajoso para usuários que desejam adaptar o *software* às suas necessidades específicas ou contribuir para o desenvolvimento da comunidade ACV;
- Possui uma interface de usuário intuitiva e amigável, o que facilita a modelagem e a análise de ACV tanto para usuários iniciantes, quanto avançados;
- Suporta uma variedade de bancos de dados de inventário de ciclo de vida (ICV), o que permite aos usuários escolher a fonte de dados mais adequada para suas análises;
- É compatível com a base de dados ecoinvent v3.10 escolhida para a fase aplicada desta pesquisa;
- Oferece uma ampla gama de recursos de modelagem, incluindo a capacidade de criar processos personalizados e combinar diferentes metodologias de avaliação de impacto;
- Possui uma comunidade ativa de usuários e desenvolvedores, o que significa que os usuários podem encontrar suporte e recursos adicionais na fase de modelagem.

3.3.

Métodos de avaliação do impacto do ciclo de vida

As etapas de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) para a realização de estudos de ACV espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica devem ser realizadas de acordo com as orientações e requisitos das Normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009. Para tanto, são utilizados fatores de caracterização (FC), que quantificam os efeitos potenciais decorrentes dos fluxos elementares para cada categoria de impacto associada, em geral, expressas como áreas de proteção (sigla em inglês, AoP).

Algumas categorias de impacto são caracterizadas segundo diferentes modelos, em decorrência das escolhas realizadas pelos desenvolvedores, que variam desde questões mais conceituais, como a definição da categoria de impacto, a aspectos mais técnicos, como a escolha das escalas espacial e temporal e das fontes de dados. Desta forma, apesar de existirem esforços internacionais referentes a recomendações de indicadores de categoria e de modelos de caracterização, é relevante que sejam escolhidos modelos de caracterização os

mais apropriados ao contexto brasileiro, que considerem os biomas, solos, climas e divisões geográficas e reflitam as vulnerabilidades das regiões brasileiras.

Com base nos resultados da revisão bibliográfica apresentada no capítulo anterior, identificou-se que os métodos TRACI, CML-IA, IMPACT World+ e ReCiPe (versões 2008 e 2016) foram os empregados nos diversos estudos sobre ACV publicados no período de 2010 a 2023. Embora todos os quatro métodos abordados nesta seção sejam amplamente utilizados em estudos de ACV, suas diferenças residem principalmente em termos das categorias de impacto; fatores de caracterização; escalas temporais e espaciais; e como a incerteza é tratada em cada método (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 - Principais características dos métodos de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

Método	Categorias de impacto	Fatores de categorização	Escalas temporais e espaciais	Análise de incerteza
TRACI (Bare, 2011)	Depleção de ozônio; aquecimento global; acidificação; eutrofização; formação de fumaça (<i>smog</i>); saúde humana (carcinogênicos); saúde humana (não carcinogênicos); saúde humana (poluentes); ecotoxicidade; esgotamento de combustíveis fósseis; uso da terra; e uso da água.	Baseados na massa da substância química emitida, no destino da substância no ambiente e na potência do estressor. Inclui uma ampla gama de fatores de caracterização para avaliar todas as substâncias de entrada na AICV.	Considera escalas temporais e espaciais. Escopo de aplicação global para as categorias depleção de ozônio e aquecimento global. Escopo de aplicação para a América do Norte para acidificação, eutrofização e formação de fumaça. Escopo de aplicação para os EUA para as categorias referentes à saúde humana e à ecotoxicidade.	Aborda a incerteza, incentivando o uso de fontes de dados de alta qualidade e técnicas de modelagem. Os usuários são aconselhados a escolher os melhores dados disponíveis para reduzir a incerteza nos resultados da avaliação.
CML-IA (Guinée, 2002)	Depleção de recursos abióticos; uso da terra; mudança climática; depleção de ozônio estratosférico; toxicidade humana; ecotoxicidade aquática de água doce; ecotoxicidade aquática marinha; ecotoxicidade terrestre; formação de foto-oxidantes; acidificação; e eutrofização. Aborda também algumas categorias de impacto adicionais, como, por exemplo, perda de função de suporte à vida; perda de biodiversidade; ecotoxicidade em água doce (sedimentos); e ecotoxicidade marinha (sedimentos).	Este método, por incluir um conjunto abrangente de fatores de caracterização (CFs) para avaliar todas as substâncias de entrada, adota modelo de exposição multimídia como o USES 2.0, que cobre vários compartimentos ambientais e vias de exposição.	As especificações espaciais e temporais consideradas neste método para AICV incluem a diferenciação de categorias de impacto com base em categorias de linha de base, específicas do estudo e outras categorias. Escopo de aplicação global, exceto para as categorias de impacto acidificação e formação de foto-oxidantes, que apresentam escopo de aplicação direcionado para a Europa.	Abordada por meio de análise de sensibilidade, análise de cenários e consideração da qualidade e confiabilidade dos dados no processo de avaliação. A análise de sensibilidade ajuda a entender a influência de diferentes parâmetros nos resultados, enquanto a análise de cenários explora as implicações de diferentes pressupostos ou cenários nos resultados da avaliação.

Quadro 3.2 - Principais características dos métodos de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) (Cont.)

Método	Categorias de impacto	Fatores de categorização	Escalas temporais e espaciais	Análise de incerteza
IMPACT World+ (Bulle et al., 2019)	Mudanças climáticas (curto e longo prazo); depleção da camada de ozônio; acidificação de água doce; acidificação terrestre; eutrofização de água doce; eutrofização marinha; ecotoxicidade de água doce; toxicidade humana (câncer); toxicidade humana (não câncer); formação de material particulado; formação oxidante fotoquímica; radiação ionizante; uso de recursos minerais; uso de recursos fósseis; escassez de água; ocupação da terra (biodiversidade); transformação da terra (biodiversidade).	Inclui um conjunto abrangente de fatores de caracterização para avaliar todas as substâncias de entrada. Os fatores são baseados em matrizes de fatores de destino (FF), matrizes de fatores de exposição (XF), matrizes de fatores de exposição-resposta (ERF) e vetores de fatores de gravidade (SF) para categorias de impacto relacionadas a emissões regionalizadas.	Resoluções espaciais em quatro níveis: (i) padrão global (não resolvido espacialmente); (ii) continental; (iii) nacional; e (iv) resoluções nativas. Este último corresponde ao nível original de resolução para um dado indicador de impacto. A escala espacial considerada é definida em torno dos parâmetros de modelagem mais sensíveis e espacialmente variáveis, como por exemplo, bacias para impactos de uso da água e biomas para impactos de uso da terra	A incerteza é abordada por meio da consideração da variabilidade espacial, incerteza relacionada a parâmetros e modelos, e uso de técnicas de análise de incerteza para avaliar a robustez dos resultados.
ReCiPe2016 (Huijbregts et al., 2017)	Formação de material particulado; formação de ozônio (saúde humana); radiação ionizante; depleção de ozônio estratosférico; toxicidade humana carcinogênica; toxicidade humana não-carcinogênica; mudanças climáticas; consumo de água; ecotoxicidade aquática; eutrofização de água doce; formação de ozônio; ecotoxicidade terrestre; acidificação terrestre; uso da terra; ecotoxicidade marinha; escassez de recursos minerais; escassez de recursos fósseis.	Usados para quantificar a contribuição de uma atividade para cada categoria de impacto nos pontos intermediários (<i>midpoints</i>). Já os impactos nos pontos finais (<i>endpoints</i>) devem se concentrar em três áreas de proteção: (i) saúde humana; (ii) qualidade do ecossistema; e (iii) escassez de recursos naturais. Define 20 caminhos de danos entre os pontos intermediários e finais de impactos.	Considera especificações espaciais e temporais ao se referir à escala global, fatores de caracterização representativos da escala global, mantendo a possibilidade para algumas categorias de impacto de implementar fatores de caracterização em uma escala nacional ou continental.	Abordada, selecionando-se modelos capazes de quantificar caminhos de danos relevantes para os fatores de caracterização dos pontos intermediários para pontos finais e reconhecendo-se as limitações e incertezas associadas aos modelos ambientais e bancos de dados usados para avaliação dos impactos ambientais.

Como resultado da análise comparativa dos métodos TRACI, CML-IA, IMPACT World+ e ReCiPe2016, a escolha pelo método ReCiPe2016 baseou-se nas seguintes razões:

- Segue as diretrizes e as normas internacionais para ACV, visando garantir consistência e comparabilidade dos resultados;

- Fornece fatores de caracterização harmonizados para 18 categorias de impacto nos pontos intermediários (*midpoints*) e três nos pontos finais (*endpoints*), representativos em escala global (Huijbregts et al., 2017);
- Não inclui o maior número possível de fatores de caracterização para avaliar todas as substâncias de entrada. Em vez disso, concentra-se em selecionar modelos ambientais e bancos de dados preferidos por categoria de impacto nos pontos intermediários (*midpoints*), que podem quantificar caminhos de danos relevantes (*damage pathways*);
- Segundo Ugaya et al, (2019), adota o único modelo de caracterização para acidificação terrestre, que disponibiliza fatores de caracterização para o Brasil (Roy et al., 2012a, 2012b, 2014; e Azevedo et al., 2013a);
- Considera especificações espaciais e temporais ao se referir à escala global. Inclui fatores de caracterização representativos da escala global, mantendo a possibilidade para algumas categorias de impacto de implementar fatores de caracterização em uma escala nacional ou continental. Considera três diferentes períodos de tempo, a saber: (i) 20 anos; (ii) 100 anos; ou (iii) infinito;
- É um método flexível, podendo ser aplicado a diferentes tipos de tecnologias de geração de energia, como solar, eólica, hidrelétrica, entre outras, permitindo comparações mais amplas;
- É compatível com a base de dados ecoinvent v3.10 (FitzGerald et al., 2023) e o *software* de modelagem openLCA v.1.9 (Ciroth et al., 2019), que serão adotados no estudo de ACV espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica.

A seguir, descreve-se o método ReCiPe2016 (*Recommendation for a Midpoint and Endpoint Hierarchization within the Impact Assessment of Life Cycle Assessment*), que foi desenvolvido pela primeira vez em 2008 pela cooperação entre o RIVM, a Universidade Radboud de Nijmegen, a Universidade de Leiden e a PRé Sustainability.

O objetivo principal do método ReCiPe é transformar a longa lista de resultados do inventário do ciclo de vida em um número limitado de indicadores. Esses indicadores expressam a severidade relativa em uma categoria de impacto ambiental, sendo classificados em dois níveis: 18 indicadores de impacto nos pontos intermediários (*midpoints*) e três indicadores de impacto nos pontos finais

(*endpoints*). É um método de média única, que considera uma abordagem de modelagem de via de causa-efeito, tanto para a avaliação de impacto nos pontos intermediários, quanto nos pontos finais. Inclui ainda 20 caminhos de danos, modelados para representar as relações causais entre as atividades humanas e os impactos ambientais resultantes (Huijbregts et al., 2017; RIVM, 2017). Eles são definidos como os caminhos que conectam as emissões e extrações de recursos a impactos ambientais específicos nas referidas áreas de proteção.

As 18 categorias de impacto nos pontos intermediários são: (i) mudanças climáticas; (ii) depleção do ozônio estratosférico; (iii) radiação ionizante; (iv) formação de material particulado; (v) formação de ozônio fotoquímico (ecossistemas terrestres); (vi) formação de ozônio fotoquímico (saúde humana); (vii) acidificação terrestre; (viii) eutrofização de água doce; (ix) eutrofização marinha; (x) toxicidade humana (cancerígena); (xi) toxicidade humana (não cancerígena); (xii) ecotoxicidade terrestre; (xiii) ecotoxicidade aquática; (xiv) ecotoxicidade marinha; (xv) uso da terra; (xvi) consumo de água; (xvii) depleção de recursos minerais; e (xviii) depleção de recursos fósseis.

No capítulo 4, seção 4.2, descrevem-se as 18 categorias de impacto nos pontos intermediários e respectivas características. Os fatores de caracterização (CFs) apresentados no Quadro 4.3 são usados para quantificar a contribuição de uma atividade para cada categoria de impacto, enquanto os indicadores fornecem uma medida quantitativa dos impactos associados a esta atividade.

Vale destacar que o método ReCiPe2016 enfatiza a qualidade de modelos ambientais e bancos de dados por categoria de impacto nos pontos intermediários que possam melhor definir caminhos de danos (*damage pathways*) relevantes dos fatores de caracterização nos pontos intermediários até os impactos ambientais específicos em três áreas distintas de proteção, a saber: saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos (Quadro 4.4).

De especial interesse para uso nesta pesquisa, o método ReCiPe2016 considera especificações espaciais e temporais ao se referir à escala global e fatores de caracterização representativos da escala global, porém mantendo a possibilidade de implementar fatores de caracterização em uma escala nacional ou continental para algumas categorias de impacto (Huijbregts et al., 2017; RIVM, 2017).

4

Modelo de avaliação de ciclo de vida espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica

Neste capítulo, propõe-se o modelo conceitual de avaliação de ciclo de vida espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica, tendo como base as Normas NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009.

Os estudos de ACV podem ser desenvolvidos segundo duas abordagens distintas: (i) atribucional; e (ii) consequential, como abordado no capítulo 2 (seção 2.1). Considerando que a avaliação do ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica objeto desta pesquisa será conduzida segundo uma abordagem espaço-temporal, a modelagem adotada foi a consequential, por considerar as consequências das escolhas e de mudanças nas etapas de construção, operação e descomissionamento das usinas hidrelétricas a serem analisadas. A modelagem da análise do ciclo de vida consequential (ACVC) é a recomendada por permitir antecipar os possíveis estados futuros desses sistemas em diferentes cenários.

4.1.

Visão geral do modelo

A Figura 4.1 apresenta a visão geral do modelo de avaliação de ciclo de vida espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica, estruturado segundo as quatro fases de ACV definidas nas Normas NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009, a saber:

- (i) Definição do objetivo e escopo;
- (ii) Análise de inventário do ciclo de vida;
- (iii) Avaliação do impacto do ciclo de vida; e
- (iv) Interpretação do ciclo de vida.

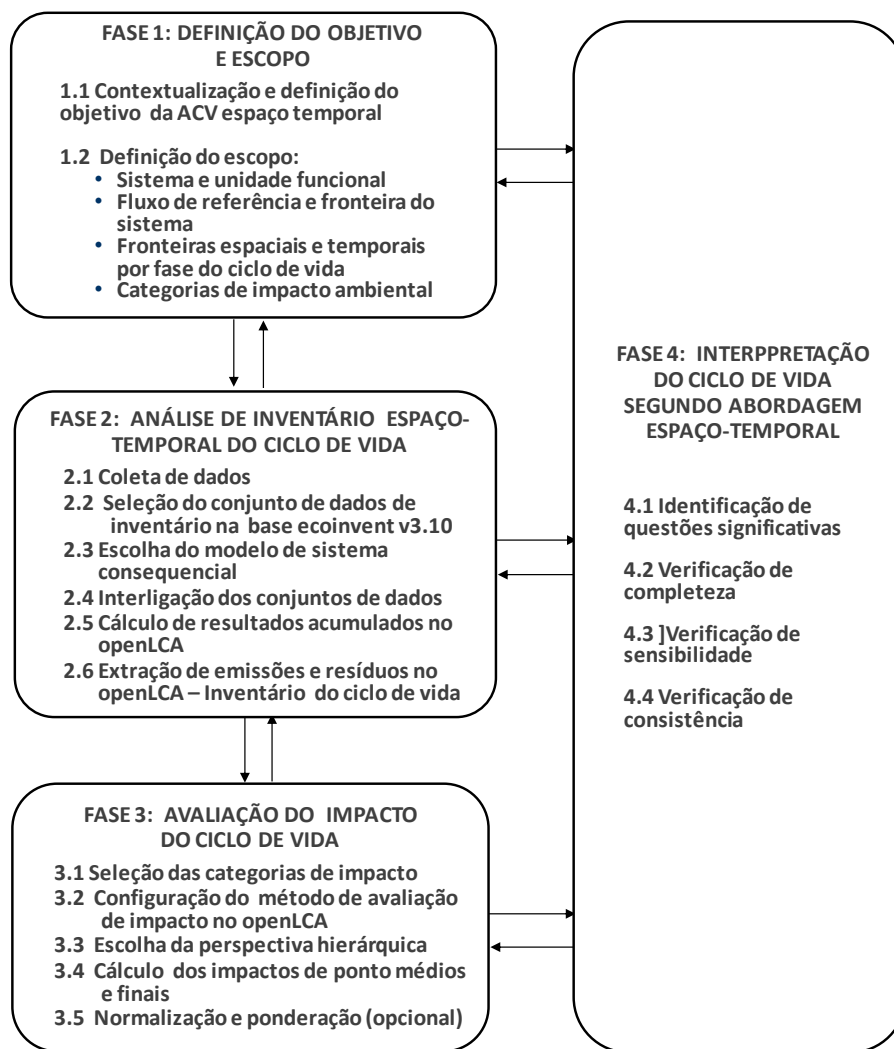


Figura 4.1 - Visão geral do modelo de ACV espaço-temporal de sistemas de geração hidrelétrica

Fonte: Elaboração própria.

4.2.

Visão detalhada do modelo

Nesta seção, descrevem-se as fases que integram o modelo, conforme o fluxograma da Figura 4.1.

4.2.1.

Fase 1: Definição de objetivo e escopo

Inicialmente, a definição do objetivo deve ser contextualizada com a descrição dos seguintes itens de forma não ambígua: (i) a aplicação pretendida; (ii) razões para a realização do estudo; (iii) partes interessadas, ou seja, a quem se pretende comunicar os resultados do estudo de ACV espaço-temporal; e (iv) se

existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

A aplicação pretendida refere-se a estudos de ACV espaço-temporal de sistemas de geração hidrelétrica no Brasil, focalizando-se usinas hidrelétricas com reservatórios.

Dentre as razões para a realização desse estudo de ACV, destacam-se: (i) a recente introdução de fontes renováveis intermitentes; (ii) a dificuldade de aprovação e licenciamento de hidrelétricas; (iii) a recente crise hidrológica dos últimos cinco anos e a necessidade cada vez maior de implantação de usinas termoelétricas; (iv) a disponibilidade de recursos naturais no Brasil para uma matriz sustentável e diversificada; (v) a contribuição para práticas *Environmental, Social, and Governance* (ESG), temática que entrou na pauta das empresas e instituições, expressando a preocupação com sustentabilidade e a busca por melhores práticas ambientais, sociais e de governança; e (vi) a contribuição deste estudo para o avanço do conhecimento em ACV de sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica no Brasil e para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil), por incluir parâmetros temporais e espaciais na fase de modelagem consequential.

Os resultados da aplicação da metodologia de avaliação espaço-temporal de ciclo de vida dos sistemas de geração energia hidrelétrica objeto desta pesquisa poderão subsidiar: (i) a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental desses sistemas em diversos pontos de seus ciclos de vida; (ii) o nível de informação para processos decisórios nas empresas de geração ou armazenamento de energia elétrica e para formuladores de políticas públicas voltadas para a sustentabilidade da geração e armazenamento de energia elétrica no Brasil; (iii) a seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes, incluindo a indicação de fontes de dados e técnicas de medição; e (iv) a apresentação de novos empreendimentos de geração ou armazenamento de energia elétrica segundo uma análise comparativa de seus impactos ambientais e sociais.

As partes interessadas nos resultados deste estudo são: (i) as empresas de geração ou armazenamento de energia elétrica no Brasil; (ii) a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); (iii) o Ministério de Minas e Energia (MME); (iv) o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS); (v) a Empresa de Pesquisa

Energética (EPE); (vi) o Ministério de Meio Ambiente (MMA) e órgãos ambientais brasileiros nas esferas federal, estadual e municipal; (vii) fornecedores de equipamentos e materiais para a construção das usinas hidrelétricas com reservatórios; (viii) empresas de consultoria; e (ix) instituições de ensino e pesquisa.

4.2.1.1.

Objetivo da ACV espaço-temporal

O objetivo da ACV espaço-temporal em questão é avaliar os impactos ambientais de usinas hidrelétricas com reservatório no Brasil ao longo de todo o ciclo de vida, contribuindo no futuro para uma visão comparativa entre as diversas alternativas de expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN) até o horizonte de 2050.

4.2.1.2.

Escopo da ACV espaço-temporal

Os itens que integram o escopo da ACV espaço-temporal são descritos a seguir e referem-se a: (i) o sistema a ser estudado; (ii) a unidade funcional; (iv) o fluxo de referência e fronteiras temporais e espaciais do sistema; (v) procedimentos de alocação; (v) metodologia de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e tipos de impactos; (vi) tipos e fontes de dados; (vii) e requisitos de qualidade dos dados.

Deve-se destacar que o objetivo e o escopo da ACV em alguns casos podem ser revistos devido a limitações não previstas, porém as referidas Normas recomendam que tais modificações, em conjunto com suas justificativas, sejam documentadas.

Sistema a ser estudado

O sistema de geração de energia hidrelétrica que será objeto deste modelo refere-se a uma hidrelétrica com reservatório. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as usinas hidrelétricas com reservatório são aquelas que se enquadram em uma destas três condições: (i) usinas construídas com potência instalada superior a 30 MW sujeitos à outorga de autorização; (ii) usinas construídas com potência instalada inferior a 50 MW sujeitos à outorga de concessão; e (iii) usinas independentes da potência instalada que tenham sido objeto de outorga de concessão ou de autorização (ANEEL, 2020).

Neste estudo, são consideradas usinas hidrelétricas com reservatórios de acumulação, que armazenam água durante o período chuvoso para uso durante a seca. A seguir, descreve-se de forma sucinta o princípio de funcionamento dessas usinas. Elas operam utilizando o movimento das águas de um rio, convertendo a energia potencial da água em energia cinética e, subsequentemente, em energia mecânica.

A água é armazenada no reservatório por meio de barragens que controlam seu nível e são equipadas com vertedouros. Esses vertedouros se abrem para permitir o fluxo da água excedente durante períodos de chuvas intensas. A água armazenada no reservatório é então direcionada através de um aqueduto ou circuito de adução até as turbinas. As turbinas, movidas pela energia mecânica da água, acionam os geradores, produzindo energia elétrica. Este processo de armazenamento e conversão de energia é essencial para garantir um fornecimento contínuo de eletricidade, especialmente durante os períodos de estiagem.

Os principais componentes de componentes de uma usina hidrelétrica com reservatório são apresentados no Quadro 4.1, a seguir.

Quadro 4.1 - Principais componentes de uma usina hidrelétrica com reservatório

Componente	Descrição
Barragem	Estrutura transversal ao leito dos rios, que bloqueia sua passagem e tem como função basicamente represar a água formando um reservatório, regularizar vazões e amortecer golpes de aríete. As barragens podem ser classificadas segundo seu material de construção em barragens de terra, de enrocamento (pedaços de rocha), de concreto ou ainda mistas (trechos de concreto e trechos de terra e/ou enrocamento).
Reservatório	Lago artificial formado em função do represamento do rio. Em função de seu propósito e das dimensões do reservatório, as usinas são classificadas em usinas de acumulação ou usinas de fio d'água. Usinas de acumulação são aquelas dotadas de reservatórios para garantir uma maior regularidade de vazão entre os períodos de cheias e estiagem, enquanto usinas a fio d'água são aquelas que dispõem de capacidade de armazenamento muito reduzida. O tamanho do reservatório pode variar de acordo com a topografia e o volume de água necessário para a operação contínua da usina.
Extravasoires	Dispositivos responsáveis por evitar o transbordamento do reservatório em caso de vazão excedente, permitindo sua passagem direto para jusante. Podem ser de superfície (vertedouros) ou de fundo, e em geral são dotados de um dissipador de energia, que impede que ocorram danos à estrutura devido à ação da água em queda.
Comportas e acessórios	Componentes que permitem isolar a água do sistema de geração, permitindo por exemplo a manutenção das máquinas. Além das comportas e de seus mecanismos de acionamento, há ainda as comportas de emergência, conhecidas como <i>stop-logs</i> . Esses são usados quando a comporta necessita de manutenção, ou em casos de emergência. Quando não utilizados são guardados pendurados sobre a ranhura acima do nível d'água, sendo movimentados quando necessário por meio de um guindaste dotado de um dispositivo conhecido como viga pescadora.

Quadro 4.1 - Principais componentes de uma usina hidrelétrica com reservatório (cont.)

Componente	Descrição
Tomada d'água	Ponto onde se inicia a condução da água entre o reservatório e as turbinas, conhecido com adução. Sua estrutura deve ser tal que impeça a entrada de corpos estranhos, danos ou obstruções ao duto, além de fechar a entrada d'água quando necessário. As tomadas d'água em geral são equipadas com grades de proteção, comportas (e eventualmente <i>stop-logs</i>), além de mecanismo de limpeza de grades.
Adutoras	Toda a estrutura utilizada para ligar a tomada d'água à turbina. Esta ligação pode ser efetuada por canais de superfície livre, tubulações, túneis sob pressão ou poços forçados. A escolha do tipo a ser utilizado depende da usina e suas condições topográficas, uma vez que a barragem pode estar tanto junta, como muito distante da tomada d'água.
Casa de força	Edifício responsável por abrigar os equipamentos de geração de energia, como turbinas, geradores., painéis e outros equipamentos elétricos. A localização desta e suas características construtivas dependem do projeto.
Turbinas	Máquinas que convertem a energia da água em movimento rotativo. Existem diferentes tipos de turbinas (Francis, Pelton, Kaplan) dependendo da queda d'água e do fluxo disponível.
Geradores	Equipamentos acoplados às turbinas que convertem a energia mecânica em energia elétrica.
Chaminés de equilíbrio e câmaras de descarga	Construções verticais dispostas no ponto de transição, aberta ao ar livre. A única diferença entre chaminés de equilíbrio e câmaras de descarga são características construtivas, que dependem do empreendimento. Dependendo do caso estas estruturas podem ou não conter equipamentos auxiliares, como comportas, stop-logs, válvulas, dentre outros.

Fonte: Baseado em Ribeiro (2003).

Unidade funcional

Um dos principais objetivos desta etapa é fornecer uma referência em relação à qual os dados de entrada e saída possam ser normalizados. A unidade funcional, portanto, deve ser claramente definida e mensurável. Isso posto, a unidade funcional é de 1 kWh de energia hidrelétrica produzida. Ao definir a unidade funcional dessa maneira, será possível comparar no futuro os sistemas de geração de energia hidrelétrica com outros sistemas de geração ou armazenamento de energia em termos de seu desempenho ambiental ao longo de todo o ciclo de vida, segundo uma abordagem espaço-temporal.

Fluxo de referência e fronteiras temporais e espaciais do sistema

A definição do fluxo de referência, bem como das fronteiras temporais e espaciais de uma usina hidrelétrica com reservatório, é etapa essencial para determinar quais processos elementares devem ser incluídos na avaliação do ciclo de vida (ACV) espaço-temporal. Para a modelagem proposta, foram consideradas todas as fases do ciclo de vida, do berço ao túmulo, conforme ilustrado na figura 4.2 a seguir.

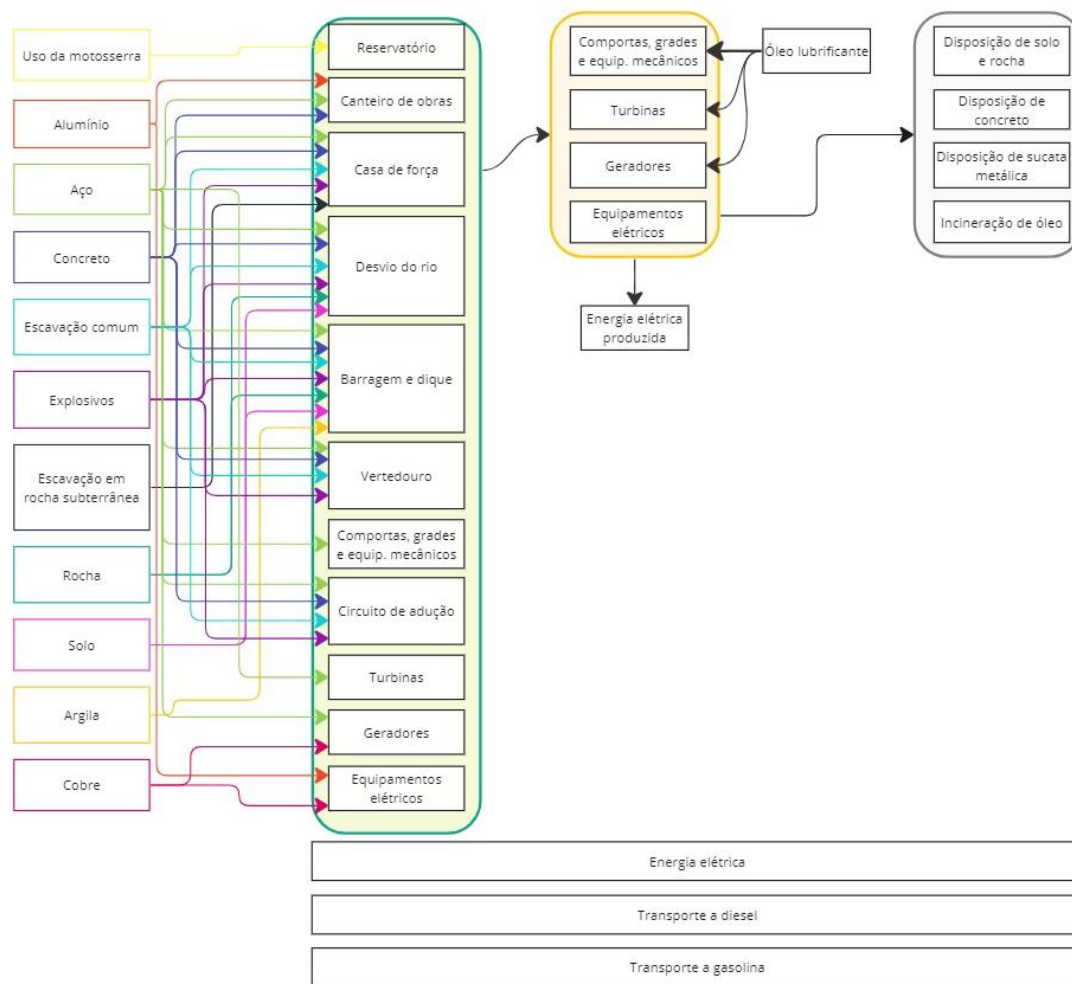


Figura 4.2 – Fluxo de referência de uma usina hidrelétrica com reservatório
Fonte: Elaboração própria.

Para determinar as fronteiras espaciais e temporais do sistema em foco, foram analisados 27 trabalhos prévios relevantes publicados no período de 2010 a 2023, referentes a estudos de ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica em diversos países, incluindo Brasil (Quadro 2.1). Além desses estudos, documentos de referência publicados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o contexto brasileiro também foram consultados (por exemplo, EPE, 2010a; 2010b; 2022).

Nos estudos prévios analisados e resumidos no Quadro 2.1, notou-se uma simplificação na representação dos fluxos de entrada e saída relacionados aos processos elementares. Nesse sentido, a representação gráfica desses fluxos, como mostra a Figura 4.2, juntamente com o detalhamento das unidades funcionais dinâmicas por fluxo elementar em cada fase do ciclo de vida da usina hidrelétrica com reservatório pode ser considerada uma contribuição útil para o campo de ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica.

Sob a perspectiva metodológica da abordagem espaço-temporal, destacam-se os seguintes estudos para a presente modelagem: (i) a tese de doutorado de Beloin-Saint-Pierre (2012), que propôs o método ESPA+ (*Enhanced Structure Path Analysis*) e o aplicou em um sistema de geração de energia fotovoltaica; (ii) a tese de doutorado de Maier (2017), que aprimorou o modelo ESPA+, incorporando novos recursos da versão 3.5 da base de dados ecoinvent, cinco anos após a publicação da tese de Beloin-Saint-Pierre; e (iii) o estudo de Schomberg et al. (2022), que incorporou considerações espaciais ao longo do ciclo de vida de quatro usinas de geração de energia elétrica, incluindo uma usina hidrelétrica a fio d'água. Embora este último estudo não tenha focado especificamente em uma usina hidrelétrica com reservatório, ele se mostrou relevante para a fase de modelagem devido ao uso da base de dados ecoinvent v.3.5, do *software* de modelagem openLCA e do método ReCiPe2016 para calcular os impactos ambientais da usina. Essas ferramentas foram escolhidas para a modelagem e aplicação do modelo na Usina Hidrelétrica Sinop (capítulo 5).

A partir desses estudos, pode-se construir um enquadramento conceitual que possibilitou a identificação objetiva de onde e como incorporar considerações temporais e espaciais nas três primeiras fases de estudos de ACV espaço-temporal de uma usina hidrelétrica com reservatório, incluindo aspectos como variações inerentes às regiões da cadeia de suprimento e do empreendimento, resolução

temporal e modelagem prospectiva. Isso posto, definem-se, a seguir, as fronteiras temporais de uma usina hidrelétrica com reservatório em dois níveis:

- (i) tempo de vida útil da usina em anos; e
- (ii) tempo de cada processo elementar ou momento de utilização de seus elementos por fase de ciclo de vida da usina.

O tempo de vida útil das usinas hidrelétricas com reservatórios pode variar entre 50 e 100 anos, dependendo das condições de operação e manutenção. Fatores como a erosão dos equipamentos e a sedimentação nos reservatórios influenciam essa longevidade (Asdrubali et al., 2015). Esses autores realizaram uma revisão abrangente e harmonização de estudos sobre sistemas de geração de energia hidrelétrica para abordar a variabilidade nos resultados de estudos prévios de ACV, propondo 70 anos como o tempo de vida harmonizado. Com base em Asdrubali et al. (2015), adotou-se 60 anos como a fronteira temporal na fase de modelagem no primeiro nível da determinação das fronteiras temporais.

O segundo nível refere-se ao tempo de cada processo ou momento de utilização de seus elementos nos fluxos elementares das fases do ciclo de vida dos sistemas em foco. As fronteiras temporais de segundo nível serão apresentadas no Quadro 4.2, juntamente com as fronteiras espaciais ou limites geográficos desses processos.

Com relação à determinação das fronteiras espaciais para o estudo de ACV espaço-temporal de uma usina hidrelétrica com reservatório, recorreu-se à base de dados ecoinvent v3.10, que define essas fronteiras como sendo os limites geográficos que caracterizam as áreas consideradas para a avaliação dos fluxos elementares do ciclo de vida dos sistemas em foco.

Particularmente na base de dados ecoinvent v3.10, a localização geográfica ou ‘geografia’ de um fluxo elementar de processo do ciclo de vida pode ser: (i) em um ou mais pontos específicos, quando a localização de instalações de produção específicas for conhecida; (ii) ao longo de uma ou mais linhas, por exemplo, para atividades de transporte; ou (iii) dentro de uma ou mais áreas ou quando a localização da atividade específica é desconhecida.

Conforme discutido na seção 3.1, todas as localizações de pontos e linhas estão contidas dentro de uma área específica. Isso implica que: (i) uma localização de ponto não pode estar na fronteira de uma área; (ii) uma linha não pode estar sobre ou ao longo das fronteiras (mas pode cruzá-las, ou seja, pertencer a mais de uma área); e (iii) uma fronteira não pode coincidir exatamente com um ponto ou seguir exatamente uma linha.

A localização geográfica indicada dessa maneira no Quadro 4.2 refere-se à validade do conjunto de dados para uma determinada ‘geografia’. Os dados podem ser originalmente coletados em uma localização geográfica diferente e interpolados ou extrapolados para a geografia considerada. Para garantir a completude, a base de dados ecoinvent v3.10 contém um conjunto de dados de referência de atividade global (um conjunto de dados com a configuração geográfica 'Global') para cada uma das atividades nela incluídas.

Quando novos dados locais foram adicionados após a geração inicial de um conjunto de dados global, idealmente, o conjunto de dados global deve ser atualizado para continuar representando a média global. Essa atualização, portanto, nem sempre foi feita. Em alguns casos, isso leva a quantidades negativas para algumas trocas nos conjuntos de dados ROW (*Rest of World*), subsequentemente gerados. Como essas quantidades negativas são obviamente artefatos, elas são eliminadas automaticamente definindo-se as quantidades como zero em vez disso e marcando-se isso no campo de comentário.

As localizações geográficas são registradas na base de dados ecoinvent v3.10 com uma resolução máxima de 0,001 graus (cerca de 100 metros no equador, menor em direção aos polos). Com relação à resolução temporal, definiu-se a resolução anual, com base no método ESPA⁺ proposto por Beloin-Saint-Pierre (2012).

A seguir, apresentam-se no quadro 2.2 as fronteiras espaciais ou ‘geografias’ referentes aos fluxos elementares relacionados aos processos elementares de cada fase do ciclo de vida dos sistemas, juntamente com respectivas fronteiras temporais de segundo nível.

Para determinar as fronteiras temporais do ciclo de vida de uma usina hidrelétrica com reservatório, considerou-se o ano 1 como o primeiro ano de construção da usina, etapa em que se busca a obtenção das matérias-primas e fabricação dos itens necessários para sua operação. A construção de pontes e vias e o sistema de transmissão não foram considerados no escopo deste estudo. Para esta etapa, considerou-se a duração de cinco anos.

A etapa de operação é considerada do ano 6 ao ano 55, contabilizando os 50 anos de operação. Já a etapa de descomissionamento é considerada nos cinco anos posteriores, ou seja, do ano 56 ao ano 60. Durante o período de operação da usina, não será considerada a troca de turbinas, de geradores e outros equipamentos necessários para manutenção.

Quadro 4.2 – Fronteiras espaciais e temporais de usinas hidrelétricas com reservatório por fase do ciclo de vida

Fase	Processo elementar	Fluxos elementares	Fronteiras espaciais e temporais	
			Local	Momento de utilização
Construção	Reservatório	Motosserra	Site de instalação da usina	Anos 1-3
		Transporte	Site de instalação da usina	Anos 1-3
	Canteiro de obras	Alumínio (alojamentos)	Estados do Brasil	Ano 1
		Aço	Estados do Brasil	Ano 1
		Concreto ¹⁰	Estados do Brasil	Ano 1
	Casa de força	Escavação comum	Site de instalação da usina	Anos 3-4
		Escavação em rocha (considera explosivos)	Site de instalação da usina	Anos 3-4
		Escavação em rocha subterrânea	Site de instalação da usina	Anos 3-4
		Explosivos	Estados do Brasil	Anos 3-4
		Concreto ¹¹	Estados do Brasil	Anos 3-4
		Aço	Estados do Brasil	Anos 3-4
	Desvio do rio	Escavação comum	Site de instalação da usina	Anos 1-2
		Escavação em rocha (considera explosivos)	Site de instalação da usina	Anos 1-2
		Explosivos	Estados do Brasil	Anos 1-2
		Concreto ¹²	Estados do Brasil	Anos 1-2
		Aço	Estados do Brasil	Anos 1-2
		Rocha (ensecadeira)	Site de instalação da usina	Anos 1-2
		Solo	Site de instalação da usina	Anos 1-2

¹⁰ Este é um elemento que consta na baseecoinvent v.3.10, bastando definir o tipo de concreto. Deve-se, em seguida, definir de onde os elementos como água e areia são retirados e onde o cimento fabricado.

¹¹ Idem acima.

¹² Idem acima.

Quadro 4.2 – Fronteiras espaciais e temporais de usinas hidrelétricas com reservatório por fase do ciclo de vida (cont.)

Fase	Processo elementar	Fluxos elementares	Fronteiras espaciais e temporais	
			Local	Momento de utilização
Construção	Barragem e dique	Escavação comum	Site de instalação da usina	Anos 3-4
		Escavação em rocha (considera explosivos)	Site de instalação da usina	Anos 3-4
		Explosivos	Estados do Brasil	Anos 3-4
		Aço	Estados do Brasil	Anos 3-4
		Concreto ¹³	Estados do Brasil	Anos 3-4
		Rocha	Site de instalação da usina	Anos 3-4
		Solo	Site de instalação da usina	Anos 3-4
		Argila	Estados do Brasil	Anos 3-4
	Vertedouro	Escavação comum	Site de instalação da usina	Anos 3-4
		Escavação em rocha (considera explosivos)	Site de instalação da usina	Anos 3-4
		Explosivos	Estados do Brasil	Anos 3-4
		Aço	Estados do Brasil	Anos 3-4
		Concreto ¹⁴	Estados do Brasil	Anos 3-4
	Comportas/ grades e equipamentos de levantamento	Aço	Estados do Brasil	Anos 4-5
	Circuito de adução	Escavação comum	Site de instalação da usina	Anos 2-3
		Escavação em rocha (considera explosivos)	Site de instalação da usina	Anos 2-3
		Explosivos	Estados do Brasil	Anos 2-3
		Aço	Estados do Brasil	Anos 2-3
		Concreto ¹⁵	Estados do Brasil	Anos 2-3

¹³ Este é um elemento que consta na base ecoinvent v.3.10, bastando definir o tipo de concreto. Deve-se, em seguida, definir de onde os elementos como água e areia são retirados e onde o cimento fabricado.

¹⁴ Idem acima.

¹⁵ Idem acima.

Quadro 4.2 – Fronteiras espaciais e temporais de usinas hidrelétricas com reservatório por fase do ciclo de vida (cont.)

Fase	Processo elementar	Fluxos elementares	Fronteiras espaciais e temporais	
			Local	Momento de utilização
Construção	Turbinas	Aço	Estados do Brasil	Ano 5
	Geradores	Aço	Estados do Brasil	Ano 5
		Cobre	Estados do Brasil	Ano 5
	Equipamentos elétricos	Cobre	Estados do Brasil	Ano 5
		Alumínio	Estados do Brasil	Ano 5
	Transporte médio anual	Diesel	Quilometragem percorrida entre o site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil e locais no Brasil e no próprio site de instalação da usina hidrelétrica	Anos 1 -5
		Gasolina	Idem acima	Anos 1 -5
Operação e manutenção	Uso de eletricidade		Site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 1 -5
	Lubrificação	Óleo lubrificante	Site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 6-55
	Turbinas	Peças metálicas	Site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 6-55
	Geradores	Peças metálicas	Site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 6-55
	Equipamentos mecânicos	Peças metálicas	Site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 6-55
	Equipamentos elétricos	Peças e componentes	Site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 6-55
	Transporte médio anual	Diesel	Quilometragem percorrida entre o site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil e locais no Brasil e no próprio site de instalação da usina hidrelétrica	Anos 6-55
		Gasolina	Idem acima	Anos 6-55
	Uso de eletricidade	-	Site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 6-55

Quadro 4.2 – Fronteiras espaciais e temporais de usinas hidrelétricas com reservatório por fase do ciclo de vida (cont.)

Fase	Processo elementar	Fluxos elementares	Fronteiras espaciais e temporais	
			Local	Momento de utilização
Descomissionamento	Disposição de resíduos de solo e rocha	-	Em aterros próximos ao site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 56-60
	Disposição de resíduos de concreto	-	Em aterros próximos ao site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 56-60
	Disposição de sucata metálica	-	Em aterros próximos ao site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 56-60
	Incineração de óleo	-	Em usinas incineradoras próximas ao site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 56-60
	Transporte médio anual	Diesel	Quilometragem percorrida entre o site de instalação da usina hidrelétrica e locais no Brasil e no próprio site de instalação da usina	Anos 56-60
		Gasolina	Quilometragem percorrida entre o site de instalação da usina hidrelétrica e locais no Brasil e no próprio site de instalação da usina	Anos 56-60
	Uso de eletricidade	-	Site de instalação da usina hidrelétrica no Brasil	Anos 56-60

Fonte: Elaboração própria.

A estrutura civil de uma usina hidrelétrica apresenta vida útil de até 70 anos, de forma que não será considerada uma segunda realização de obras civis no presente estudo, apenas a realizada a partir do início da construção (ano 1). Para definição do tempo de construção, considerou-se o tempo historicamente adotado para este sistema de geração nos leilões de energia nova A-5, gerenciados pelo Ministério de Minas e Energia.

Em geral, os estudos de ACV de usinas hidrelétricas não consideram a fase de descomissionamento e no Brasil não existem UHE descomissionadas. No entanto, considerando a tramitação do Projeto de Lei nº 4372/21, que estabelece regras para a desativação de usinas hidrelétricas, decidiu-se incluir essa fase do ciclo de vida na determinação das fronteiras espaciais e temporais do sistema, visando a elaboração de um futuro estudo comparativo entre diferentes sistemas de geração de energia elétrica no Brasil. Na fase de descomissionamento, foi considerado o transporte para a disposição das matérias-primas utilizadas na construção da usina hidrelétrica com reservatório.

É importante ressaltar que, nesse modelo, no escopo do estudo de ACV espaço-temporal não foram incluídos a transmissão e o uso da energia elétrica após sua comercialização. Além disso, os materiais considerados nos fluxos dos processos elementares variam consideravelmente entre os empreendimentos. Por exemplo, na definição do tipo de barragem, é necessário considerar os materiais obtidos por meio da escavação realizada para sua construção.

Procedimentos de alocação

A identificação dos processos elementares apresentados no Quadro 4.2, que produzem as entradas (ou aqueles que recebem as saídas), foi realizada com a utilização dos dados disponíveis nos estudos analisados na fase de revisão da literatura (Quadro 2.1).

Buscou-se identificar as entradas e saídas da forma mais completa possível na literatura e também durante a coleta de dados adicionais para a execução do estudo empírico de ACV espaço-temporal da Usina Hidrelétrica Sinop (capítulo 5). Foram incluídos os diferentes tipos de entradas de energia para a produção e distribuição de combustíveis, energia associada a entradas não energéticas e energia de processo utilizadas dentro do sistema que foi modelado.

A definição dos critérios de corte ajudará a concentrar esforços no estudo empírico da Usina Hidrelétrica Sinop em torno daquelas áreas com maiores contribuições para os impactos ambientais do sistema. São eles:

- Massa: A utilização de massa como critério requer a inclusão na análise de ICV de todas as entradas, cuja contribuição cumulativa supere um percentual definido da entrada de massa do sistema que está sendo modelado;
- Energia: De forma semelhante, ao utilizar energia como critério requer a inclusão no estudo daquelas entradas cuja contribuição cumulativa supere um percentual definido da entrada de energia do sistema em foco;
- Significância ambiental: Refere-se à priorização prévia de processos que tenham maiores impactos em categorias específicas de avaliação de impacto ambiental (p.ex., mudanças climáticas, eutrofização ou acidificação).

Todas as entradas selecionadas à luz desses critérios de corte foram modeladas como processos elementares, que no capítulo 5 serão descritos com nível de detalhamento e clareza suficientes para permitir a reprodução da análise de inventário do ciclo de vida (ICV) do sistema em foco.

Metodologia de AICV e tipos de impactos

Como ponto de partida para a definição das categorias de impactos ambientais a serem consideradas nas etapas seguintes da ACV espaço-temporal de usinas hidrelétricas com reservatórios, tomou-se como base a estrutura analítica do método ReCiPe 2016, desenvolvido pelo National Institut for Public Health and Environment, da Holanda (RIVM).

Como abordado na seção 3.3, o método ReCiPe2016 é uma abordagem de avaliação de impacto ambiental que visa quantificar e avaliar tais impactos de diferentes atividades humanas ao longo de seus ciclos de vida. Inclui um conjunto de categorias de impacto de pontos médios (*midpoints*), respectivos fatores de caracterização e indicadores associados e pontos finais de impacto (*endpoints*) (Huijbregts et al., 2017; RIVM, 2017).

Os fatores de caracterização são usados para quantificar a contribuição de uma atividade para cada categoria de impacto, enquanto os indicadores fornecem uma medida quantitativa dos impactos ambientais associados a esta atividade.

As categorias de impacto e seus indicadores no nível médio (*midpoints*), fatores de caracterização (FC) e respectivas métricas encontram-se resumidos no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Categorias de impacto nos pontos intermediários definidas no método ReCiPe 2016 e respectivas características

Categoria de impacto	Indicador	Fator de caracterização (CF)	Unidade	Referências para o modelo de caracterização
Mudanças climáticas	Aumento do forçamento radiativo infravermelho	Potencial de aquecimento global (GWP)	kgCO ₂ eq para o ar	IPCC (2013); Joos et al. (2013)
Depleção do ozônio estratosférico	Diminuição do ozônio estratosférico	Potencial de depleção de ozônio (ODP)	kg CFC11eq para o ar	WMO (2011)
Radiação ionizante	Aumento da dose absorvida devido à radiação ionizante	Potencial de radiação ionizante (IRP)	kBq Co-60 eq para o ar	Frischknecht et al. (2000)
Formação de material particulado	Aumento da inalação de PM2.5 pela população	Potencial de formação de material particulado (PMFP)	kg PM2.5 eq para o ar	Van Zelm et al. (2016)
Formação de ozônio fotoquímico (ecossistemas terrestres)	Aumento do ozônio troposférico	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos: ecossistemas (EOFP)	kg NO _x eq para o ar	Van Zelm et al. (2016)
Formação de ozônio fotoquímico (saúde humana)	Aumento da absorção de ozônio troposférico pela população	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos: humanos (HOFP)	kg NO _x eq para o ar	Van Zelm et al. (2016)
Acidificação terrestre	Aumento de prótons em solos naturais	Potencial de acidificação terrestre (TAP)	kg SO ₂ eq para o ar	Roy et al. (2014)
Eutrofização de água doce	Aumento de fósforo em água doce	Potencial de eutrofização de água doce (FEP)	kg P _{eq} para água doce	Helmes et al. (2012)
Eutrofização marinha	Aumento de nitrogênio na água do mar	Potencial de eutrofização marinha (MEP)	kg N _{eq} para água do mar	Helmes et al. (2012)
Toxicidade humana carcinogênica	Aumento do risco de incidência de doenças cancerígenas	Potencial de toxicidade humana (HTPc)	kg 1,4-DCB eq para o ar urbano	Van Zelm et al. (2009)
Toxicidade humana não-carcinogênica	Aumento do risco de incidência de doenças não cancerígenas	Potencial de toxicidade humana (HTPcnc)	kg 1,4-DCB eq para o ar urbano	Van Zelm et al. (2009)

Continua...

Quadro 4.3 – Categorias de impacto nos pontos intermediários definidas no método ReCiPe 2016 e respectivas características (cont.)

Categoria de impacto	Indicador	Fator de caracterização (CF)	Unidade	Referências para o modelo de caracterização
Ecotoxicidade terrestre	Aumento de substâncias perigosas em solos naturais	Potencial de ecotoxicidade terrestre (TETP)	kg 1,4-DCB eq para o solo	Van Zelm et al. (2009)
Ecotoxicidade aquática	Aumento de substâncias perigosas em água doce	Potencial de ecotoxicidade aquática (FETP)	kg 1,4-DCB eq para água doce	Van Zelm et al. (2009)
Ecotoxicidade marinha	Aumento de substâncias perigosas na água do mar	Potencial de ecotoxicidade marinha (METP)	kg 1,4-DCB eq para a água do mar	Van Zelm et al. (2009)
Uso da terra	Ocupação e transformação da terra	Potencial de ocupação de terras agrícolas (LOP)	m ² ×yr crop eq	De Baan et al. (2013); Curran et al. (2014)
Consumo de água	Aumento do consumo de água	Potencial de consumo de água (WCP)	m ³	Döll e Siebert (2002); Hoekstra e Mekonnen (2012)
Depleção de recursos minerais	Aumento de minério extraído	Potencial excedente de minério (SOP)	kg Cu eq	Vieira et al. (2016)
Depleção de recursos fósseis	Aumento do potencial calorífico	Potencial de combustíveis fósseis (FFP)	kg óleo eq	Jungbluth e Frischknecht (2010)

Fonte: Huijbregts et al. (2016); RIVM (2017).

Na sequência, conceituam-se as categorias de impacto de pontos médios (*midpoints*) conforme Huijbregts et al. (2017).

Mudanças climáticas

A categoria de impacto das mudanças climáticas é avaliada usando o indicador de potencial de aquecimento global (GWP), que mede o aumento integrado do forçamento radiativo infravermelho dos gases de efeito estufa (GEEs) em termos de kg de CO₂-eq. Este indicador quantifica a contribuição de diferentes GEEs para as mudanças climáticas, fornecendo uma métrica padronizada para comparar seus efeitos de aquecimento.

Depleção do ozônio estratosférico

Esta categoria de impacto foca na depleção da camada de ozônio na estratosfera, causada principalmente por substâncias que degradam o ozônio (ODSs). A avaliação considera o potencial de depleção de ozônio (ODP) das substâncias, refletindo sua capacidade de destruir moléculas de ozônio estratosférico e contribuir para o afinamento da camada de ozônio.

Radiação ionizante

A avaliação da radiação ionizante avalia os impactos potenciais da exposição à radiação na saúde humana e nos ecossistemas. Os fatores de caracterização consideram as propriedades radiológicas das substâncias e suas contribuições para as doses de radiação e os riscos à saúde associados.

Formação de material particulado

A avaliação da formação de material particulado foca na geração de partículas finas na atmosfera a partir de várias fontes de emissão. Os fatores de caracterização consideram as emissões de material particulado das substâncias e suas contribuições para a degradação da qualidade do ar e os efeitos na saúde humana.

Formação de ozônio fotoquímico (ecossistemas terrestres e saúde humana)

Esta categoria de impacto avalia a formação de ozônio à superfície através de reações fotoquímicas envolvendo emissões precursoras. Os fatores de caracterização quantificam o potencial de formação de ozônio das substâncias e

seus impactos na saúde respiratória. Cabe ressaltar que a formação de ozônio fotoquímico abrange duas categorias de impacto, i.e., nos ecossistemas terrestres e na saúde.

Acidificação terrestre

A avaliação da acidificação avalia o potencial de acidificação das substâncias, levando a mudanças nos níveis de pH do solo e da água e impactos nos ecossistemas. Os fatores de caracterização consideram as propriedades acidificantes das substâncias e suas contribuições para a deposição ácida e acidificação dos ecossistemas.

Eutrofização de água doce

Esta categoria de impacto avalia a eutrofização dos ecossistemas de água doce causada por entradas de nutrientes, levando a um crescimento excessivo de algas e à depleção de oxigênio. Os fatores de caracterização consideram o conteúdo de nutrientes das substâncias e sua contribuição para o potencial de eutrofização em ambientes de água doce.

Eutrofização marinha

A avaliação da eutrofização marinha foca no enriquecimento de nutrientes nos ecossistemas marinhos, levando a florações de algas, hipóxia e degradação do ecossistema. Os fatores de caracterização quantificam o potencial das substâncias de contribuir para a carga de nutrientes em ambientes marinhos e seus impactos na biodiversidade marinha.

Toxicidade humana (carcinogênica e não carcinogênica)

Os fatores de dano ecotoxicológico, adicionados aos cálculos de impactos de ponto médio, foram considerados iguais a um, pois os efeitos estimados com dados de toxicidade aguda podem se aproximar dos efeitos tóxicos em condições de campo (Posthuma e De Zwart, 2006). Para a saúde humana, foram incluídos fatores de dano para efeitos carcinogênicos ou não carcinogênicos (Huijbregts et al., 2005).

Ecotoxicidade terrestre

Mede os efeitos adversos de substâncias químicas tóxicas no ecossistema terrestre, incluindo flora e fauna. Considera a exposição e a sensibilidade de organismos terrestres a contaminantes, resultando em danos à biodiversidade e à saúde do solo. A avaliação é frequentemente baseada na concentração de substâncias tóxicas no solo e sua capacidade de causar efeitos negativos nos organismos terrestres.

Ecotoxicidade aquática

Esta categoria avalia os impactos adversos de substâncias químicas tóxicas em ecossistemas de água doce, incluindo rios, lagos e riachos. Foca na exposição de organismos aquáticos a poluentes, considerando a toxicidade aguda e crônica dessas substâncias para a vida aquática.

A concentração de substâncias químicas tóxicas na água doce é utilizada para estimar o potencial de dano à fauna e flora aquáticas.

Ecotoxicidade marinha

Esta categoria de impacto mede os efeitos negativos de substâncias tóxicas nos ecossistemas marinhos, como oceanos e mares. Analisa a exposição de organismos marinhos a contaminantes, avaliando os riscos e os danos potenciais à biodiversidade marinha. A concentração de substâncias tóxicas em ambientes marinhos é utilizada para determinar o risco de efeitos adversos em peixes, corais, plantas marinhas e outros organismos marinhos.

Uso da terra

A avaliação do uso do solo avalia os impactos da transformação e ocupação do solo nos ecossistemas e na biodiversidade. Os fatores de caracterização consideram as mudanças no uso do solo associadas à produção de substâncias e suas contribuições para a perda, fragmentação e declínio da biodiversidade.

Consumo de água

A avaliação do uso da água foca no consumo e no potencial de depleção de recursos de água doce por atividades humanas. Os fatores de caracterização quantificam o consumo de água das substâncias e suas contribuições para a

escassez de água e os impactos nos ecossistemas aquáticos e no abastecimento de água humano.

Depleção de recursos minerais

A avaliação da depleção de recursos minerais foca na extração e depleção de recursos minerais não renováveis. Os fatores de caracterização quantificam o potencial de depleção de recursos das substâncias e suas contribuições para o esgotamento das reservas minerais.

Depleção de recursos fósseis

A avaliação da depleção de recursos fósseis avalia a extração e depleção de recursos de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural. Os fatores de caracterização consideram o conteúdo de combustíveis fósseis das substâncias e suas contribuições para a depleção de recursos fósseis e a escassez de energia.

A quantificação dos impactos ambientais nos pontos finais agrega os resultados da AICV em uma métrica comum, que leva em consideração as diferentes áreas de proteção e unidades de impacto. Cada uma dessas áreas de proteção possui uma unidade específica para representar os impactos, a saber:

- Saúde humana: os impactos são quantificados em termos de DALYs (anos de vida ajustados por incapacidade), que representam os anos perdidos ou em que uma pessoa fica incapacitada devido a uma doença ou acidente;
- Qualidade do ecossistema: os impactos são quantificados em termos de perda relativa local de espécies em ecossistemas terrestres, de água doce e marinhos, integrados ao longo do espaço e do tempo;
- Escassez de recursos: os impactos são quantificados em termos de dólares (\$), representando os custos adicionais envolvidos na extração futura de recursos minerais e fósseis.

A incerteza na quantificação dos impactos ambientais pelo método ReCiPe2016 é abordada através de análises de cenários. Existem três cenários distintos que agrupam diferentes fontes de incerteza e escolhas metodológicas. Isso significa que o ReCiPe2016 não fornece apenas um conjunto de fatores de caracterização nos pontos intermediários e finais, mas sim três conjuntos diferentes. Os usuários são encorajados a utilizar todos os três cenários para

verificar a sensibilidade dos resultados da AICV. Alguns dos aspectos abordados nos cenários incluem:

- Horizonte de tempo para poluentes de longa vida: considerados horizontes temporais de 20 anos, 100 anos e 1000 anos-infinito em cada cenário, respectivamente;
- Nível de evidência disponível para os efeitos ambientais considerados: efeitos com um nível muito alto de evidência são associados a um horizonte de tempo de 20 anos, enquanto todos os efeitos relatados são associados a um horizonte temporal de 1000 anos-infinito, criando-se dois cenários extremos.

Esses cenários permitem uma avaliação mais abrangente da incerteza nos resultados da AICV, levando-se em consideração diferentes fatores de caracterização e escolhas metodológicas que poderão influenciar a quantificação dos impactos ambientais.

No método ReCiPe2016, a quantificação e ponderação dos impactos pode ser realizada segundo três perspectivas: (i) hierárquica; (ii) igualitária; e (iii) individualista.

A perspectiva hierárquica do método ReCiPe2016 adota um horizonte temporal equilibrado (100 anos) e reflete uma abordagem intermediária entre as perspectivas igualitária e individualista. O módulo de cálculo correspondente a esta perspectiva é o ReCiPe2016 Midpoint (H), que permite quantificar os impactos ambientais em categorias de impacto nos pontos intermediários, considerando um horizonte temporal de médio a longo prazo.

A perspectiva igualitária assume um horizonte temporal muito longo (1000 anos) e reflete uma abordagem precavida e conservadora em relação aos impactos ambientais. Esta perspectiva considera que os impactos ambientais têm consequências duradouras e devem ser avaliados com o máximo de precaução possível. O módulo correspondente a esta perspectiva, ReCiPe2016 Midpoint (E), também calcula os impactos ambientais em categorias de impacto nos pontos intermediários, porém considera um horizonte temporal prolongado e efeitos potenciais no longo prazo. Nessa perspectiva, o método adota o princípio da precaução, considerando todos os danos possíveis, sem considerar a possibilidade de evitar problemas futuros, o que pode introduzir imprecisões devido à inclusão de dados sem consenso referentes a horizontes temporais de muito longo prazo.

Por fim, a perspectiva individualista adota um horizonte temporal curto (20 anos) e reflete uma abordagem pragmática, com ênfase em evidências científicas atuais e impactos ambientais que são mais imediatos. Esta perspectiva considera que os impactos no longo prazo são menos previsíveis e, portanto, dá mais peso aos efeitos que são mais evidentes e mensuráveis no curto prazo. O módulo correspondente a esta perspectiva é o ReCiPe2016 Midpoint (I), que calcula os impactos ambientais em categorias de impacto nos pontos intermediários, focando em efeitos ambientais de curto prazo e mais imediatamente mensuráveis.

Esses três módulos do método ReCiPe2016 permitem que os analistas de ciclo de vida de produtos escolham a perspectiva que melhor se adapta ao contexto do seu estudo e aos seus objetivos específicos, oferecendo flexibilidade na avaliação dos impactos ambientais. Para fins do estudo de ACV espaço-temporal objeto desta pesquisa será adotada a perspectiva hierárquica, uma vez que a vida útil das usinas hidrelétricas reportada na literatura se situa em torno de 70 anos (Asdrubali et al, 2015). Vale ressaltar que para fins desta dissertação, considerou-se a vida útil de 60 anos.

Complementa-se a descrição das categorias de impacto com a caracterização dos caminhos para quantificação de danos ambientais segundo o método ReCiPe 2016 (Quadro 4.4).

Quadro 4.4 – Caminhos para quantificação de danos ambientais segundo o método ReCiPe 2016

Problema ambiental	Área de proteção	Caminhos para quantificação de danos ambientais (<i>damage pathways</i>)	Referências
Mudanças climáticas	Saúde humana	Anos de vida perdidos e incapacitados relacionados com o aumento de malária, diarreia, desnutrição e desastres naturais, devido ao aumento da temperatura média global.	IPCC (2013); Joos et al. (2013); De Schryver et al. (2009)
	Ecossistemas terrestres	Perda de espécies relacionada à mudança nas distribuições do bioma, devido ao aumento da temperatura global.	IPCC (2013); Joos et al. (2013); Urban. (2015)
	Ecossistemas aquáticos	Perda de espécies de peixes devido à diminuição da vazão do rio.	Hanafiah et al. (2011)
Depleção da camada de ozônio estratosférica	Saúde humana	Anos de vida perdidos e incapacitados relacionados ao aumento do câncer de pele e catarata, devido à exposição aos raios UV.	WMO (2011); Hayashi et al. (2006).
Radiação ionizante	Saúde humana	Anos de vida perdidos e incapacitados relacionados ao aumento do câncer e de doenças hereditárias, devido à exposição à radiação,	Frischknecht et al. (2000); De Schryver et al. (2009)
Formação de material particulado	Saúde humana	Anos de vida perdidos e incapacitados relacionados ao aumento do câncer cardiopulmonar e de pulmão causado pela exposição a aerossóis primários e secundários.	Van Zelm et al. (2016)
Formação de ozônio fotoquímico	Saúde humana	Anos de vida perdidos relacionados ao aumento de doenças respiratórias causadas pela exposição ao ozônio.	Van Zelm et al. (2016)
	Ecossistemas terrestres	Perda de espécies de plantas, devido ao aumento da exposição ao ozônio.	Van Zelm et al. (2016)
Acidificação terrestre	Ecossistemas terrestres	Perda de espécies de plantas, devido à diminuição do pH do solo.	Roy et al. (2014)
Eutrofização de água doce	Ecossistemas aquáticos	Perda de espécies aquáticas, devido ao aumento das concentrações de fósforo.	Helmes et al. (2012) ; Azevedo et al. (2013a, b)
Eutrofização marinha	Ecossistemas marinhos	Perda de espécies aquáticas, devido ao aumento das concentrações de nitrogênio	Helmes et al. (2012)

Continua...

Quadro 4.4 – Caminhos para quantificação de danos ambientais segundo o método ReCiPe 2016 (cont.)

Problema ambiental	Área de proteção	Caminhos para quantificação de danos ambientais (<i>damage pathways</i>)	Referências
Toxicidade	Saúde humana	Anos de vida perdidos e incapacitados relacionados a efeitos oncológicos e não oncológicos, devido à ingestão e inalação de substâncias tóxicas.	Van Zelm et al. (2009)
	Ecossistemas marinhos	Perda de espécies devido à exposição química em águas marinhas.	Van Zelm et al. (2009)
	Ecossistemas terrestres	Perda de espécies devido à exposição química nos solos.	Van Zelm et al. (2009)
	Ecossistemas aquáticos	Perda de espécies devido à exposição química em água doce.	Van Zelm et al. (2009)
Consumo de água	Saúde humana	Desnutrição causada pela escassez de água.	Pfister et al. (2009)
	Ecossistemas terrestres	Diminuição na produtividade primária líquida devido à escassez de água como proxy para a perda total de espécies.	Pfister et al. (2009)
	Ecossistemas aquáticos	Perda de espécies de peixes devido à diminuição da vazão do rio.	Hanafiah et al. (2011)
Uso da terra	Ecossistemas terrestres	Perda de espécies devido a diferentes tipos de uso da terra (agricultura, silvicultura, edificações). Perda de espécies causada pela transformação de terras naturais em terras usadas, incluindo o tempo que leva para se transformar novamente em terras naturais.	De Baan et al. (2013); Curran et al. (2014)
Depleção de recursos minerais	Recursos	Aumento de custos devido ao aumento da extração de recursos minerais.	Vieira et al. (2016b)
Depleção de recursos fósseis	Recursos	Aumento de custos devido ao aumento da extração de recursos fósseis.	Vieira et al. (2016c)

Fonte: Huijbregts et al. (2016); RIVM (2017).

Tipos de fontes de dados

Para realizar um estudo de avaliação espaço-temporal do ciclo de vida de usinas hidrelétricas com reservatório, considera-se que a principal fonte de dados e informações a serem utilizadas na etapa de análise de inventário do ciclo de vida (ICV) dessas usinas é a base de dados ecoinvent v3.10.

A seguir, são detalhados os principais tipos de dados e informações que podem ser extraídos dessa base e de outras fontes para essa finalidade, como mostra o Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Tipos e fontes de dados para estudos de ACV espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica

Item	Tipo de dado	Fonte
Dados de materiais e construção	Informações sobre a produção de cimento, concreto, aço e outros materiais de construção usados na construção de barragens e infraestrutura associada.	ecoinvent v3.10
Dados sobre a construção de infraestruturas	Informações sobre a construção de infraestruturas específicas, como túneis, canais e estruturas de controle de água.	ecoinvent v3.10
Dados de operação e manutenção	Dados sobre a produção e transmissão de eletricidade, incluindo misturas de mercado de eletricidade para diferentes regiões e tipos de fontes energéticas.	ecoinvent v3.10
	Informações sobre os processos de manutenção de equipamentos e infraestrutura, incluindo o uso de materiais e energia para manutenção regular e reparos.	ecoinvent v3.10
Dados geográficos e temporais	Informações geográficas detalhadas, permitindo a análise de dados específicos para diferentes regiões e países. Períodos temporais com dados atualizados que refletem as condições de mercado e tecnológicas mais recentes, permitindo uma análise temporal precisa.	ecoinvent v3.10
Dados de emissões no ar, no solo e na água e resíduos	Dados sobre emissões e resíduos associados à construção, operação e descomissionamento de usinas hidrelétricas.	ecoinvent v3.10
Dados para avaliação dos impactos ambientais	Além dos dados sobre fluxos de materiais e de energia, emissões no ar, no solo e na água, fatores de caracterização para quantificação dos impactos ambientais de usinas hidrelétricas com reservatórios.	ecoinvent v3.10 ReCiPe2016
Dados sobre o projeto e operação da usina	Características técnicas da usina, área alagada, potência instalada, fator de capacidade.	Estudos de Impacto Ambiental (EIA) Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA)
Dados de qualidade da água	Parâmetros físico-químicos e biológicos da água do reservatório e dos tributários.	Programas de monitoramento ambiental da usina
Dados de uso e ocupação do solo	Classes de uso e cobertura do solo na área de influência do empreendimento.	Plataforma MapBiomass, imagens de satélite

Continua...

Quadro 4.5 – Tipos e fontes de dados para estudos de ACV espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica (cont.)

Item	Tipo de dado	Fonte
Dados de recursos naturais	Vazões, níveis d'água, pluviometria, transporte de sedimentos.	Estações hidrométricas, conforme Resolução Conjunta nº 3 da ANEEL e ANA
	Uso de recursos hídricos: Informações sobre o consumo de água e os impactos associados ao uso de recursos hídricos durante a operação das usinas.	ecoinvent v3.10
	Recursos minerais e fósseis: Dados sobre a extração e uso de recursos minerais e combustíveis fósseis necessários para a construção e operação das usinas.	ecoinvent v3.10
Dados de descomissionamento	Informações sobre o tratamento e descarte de materiais e resíduos gerados durante o descomissionamento das usinas.	ecoinvent v3.10
	Dados sobre processos de reciclagem e reutilização de materiais, como metais e concreto, após o descomissionamento.	ecoinvent v3.10
Dados de transporte	Dados de transporte de pessoas e de equipamentos, durante as três fases do ciclo de vida, construção, operação e descomissionamento.	ecoinvent v3.10

Requisitos de qualidade dos dados

A qualidade dos dados para estudos de ACV espaço-temporal de usinas hidrelétricas com reservatório como proposto neste modelo deve atender aos requisitos da Norma ABNT NBR ISO 14044:2009, a saber:

- (i) Cobertura temporal: idade dos dados e período mínimo durante o qual os dados deveriam ser coletados;
- (ii) Cobertura geográfica: área geográfica a partir da qual deveriam ser coletados dados para processos elementares de modo a satisfazer o objetivo do estudo;
- (iii) Cobertura tecnológica: tecnologia específica ou conjunto de tecnologias;
- (iv) Precisão: medida da variabilidade dos valores de dados para cada dado expresso (por exemplo, variância);
- (v) Completeza: porcentagem dos fluxos que é medida ou estimada;
- (vi) Representatividade: avaliação qualitativa do grau em que o conjunto de dados reflete a verdadeira população de interesse (por exemplo, cobertura geográfica, período de tempo e cobertura tecnológica);
- (vii) Consistência: avaliação qualitativa quanto à aplicação uniforme da metodologia do estudo aos diversos componentes da análise;

- (viii) Reprodutibilidade: avaliação qualitativa do grau em que as informações sobre a metodologia e os valores dos dados permitiriam a um executante independente reproduzir os resultados relatados no estudo;
- (ix) Fontes dos dados;
- (x) Incerteza da informação (p.ex. dados, modelos e pressupostos).

4.2.2

Fase 2: Análise de inventário do ciclo de vida (ICV) espaço-temporal

A segunda fase do modelo refere-se à análise de inventário do ciclo de vida (ICV), segundo a abordagem espaço-temporal.

Uma escala espacial mais ampla requer a definição de processos nos diferentes estágios do ciclo de vida, como mostrado no Quadro 4.2, permitindo uma resolução espaço-temporal de todo o ciclo de vida de um sistema. Se fosse adotada uma abordagem de ACV convencional não seria possível considerar as emissões no ar, no solo, na água e resíduos gerados pelos processos elementares ao longo desse período e nos diferentes estágios do ciclo de vida. Com uma abordagem dinâmica, todas essas mudanças podem ser consideradas, obtendo-se um resultado mais realista do ICV.

Para esta fase da modelagem, foi utilizado o método ESPA+ (*Enhanced Structure Path Analysis*), introduzido por Beloin-Saint-Pierre (2012) e inicialmente aplicado a um sistema de geração de energia fotovoltaica. Posteriormente, Maier (2017) aprimorou o método, incorporando novos recursos disponíveis na versão 3.5 da base de dados ecoinvent, cinco anos após o estudo de Beloin-Saint-Pierre. A aplicação do método ESPA+ por Maier foi direcionada a um sistema de geração de energia eólica.

O objetivo de adotar o método ESPA+ na presente pesquisa foi modelar o inventário de uma usina hidrelétrica com reservatório e mapear os resultados calculados para cada local e estágio do ciclo de vida ao longo do tempo. Para alcançar isso, conjuntos de dados espaciais da base de dados ecoinvent v3.10 foram utilizados no cálculo, como será demonstrado no capítulo 5. Em síntese, buscou-se investir na ideia de usar os dados espaciais disponíveis na referida base para o cálculo dinâmico.

O método proposto por Maier (2017), baseado em Beloin-Saint-Pierre (2012) refere-se a uma abordagem espaço-temporal para calcular o inventário do

ciclo de vida (ICV) de um sistema, partindo da estrutura de processos mostrada na Figura 4.3, que representa como diferentes estágios do ciclo de vida estão conectados.

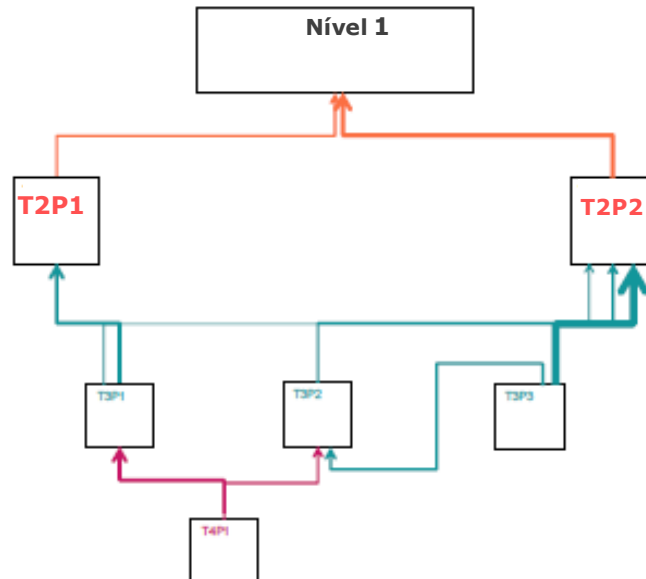


Figura 4.3 – Estrutura básica de rede de um produto e seus processos elementares relacionados
Fonte: Maier (2017)

Este diagrama de rede fornece um exemplo de como diferentes estágios do ciclo de vida (ou processos elementares) de um sistema estão interligados e como o inventário de todos os processos elementares se soma ao inventário total geral do produto final (energia hidrelétrica). Na Figura 4.3, o nível-1 consiste em dois subprocessos, T2P1 e T2P2 (cor vermelha). Esses subprocessos estão conectados aos sub-subprocessos T3P1-T3P3 (cor azul). T3P1 e T3P2 estão ainda conectados a T4P1 (cor violeta). Todas as emissões produzidas dentro dos subprocessos são alimentadas no processo de nível-1. As linhas com setas e sua espessura indicam as relações quantitativas "X" entre um processo elementar e outro.

O primeiro passo é traduzir as relações quantitativas entre os processos em uma matriz tecnológica A (matriz 4.1). Em seguida, essa matriz A é separada em submatrizes correspondentes aos processos de nível 2, de acordo com o número de processos nesse nível.

A matriz 4.1 é uma matriz $n \times n$, na qual n representa o número de processos elementares envolvidos. T1 indica o produto de nível-1. A primeira coluna representa o processo que gera o produto final e as outras colunas são para os processos elementares T2P1, ..., TiPj envolvidos no ciclo de vida do produto

final. O número de colunas necessárias para um determinado nível de processos na Matriz 4.1 é o mesmo que o número de processos incluídos na rede nesse nível (Maier, 2017).

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} T1 & T2P1 & T2P2 & T3P1 & T3P2 & T3P3 & T4P1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} T1 \\ T2P1 \\ T2P2 \\ T3P1 \\ T3P2 \\ T3P3 \\ T4P1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & 0 & X & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & X \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.1)$$

O aspecto inovador é que informações espaciais e temporais são então adicionadas a essas submatrizes. Isso permite que o cálculo do ICV seja realizado para cada processo de nível 2 separadamente, resultando em um ICV espaço-temporal para cada processo envolvido.

A matriz tecnológica A é então separada em matrizes de processos de nível-2, de acordo com o número de processos elementares de nível-2 na rede. Esta etapa é necessária para permitir o cálculo das emissões atribuíveis a cada processo de nível-2 ou estágio de alto nível do ciclo de vida do produto final. Ou seja, para poder calcular os inventários por estágio do ciclo de vida, a matriz principal é dividida em matrizes menores de acordo com cada processo no nível-1 (ver matrizes 4.2 e 4.3). As matrizes individuais incluem todos os processos de nível-2 e inferiores que contribuem com inventários para o estágio do ciclo de vida.

Para cada fase do ciclo de vida, são criadas matrizes tecnológicas e vetores ambientais individuais. A dimensão temporal é adicionada usando distribuições anuais para cada estágio. Dados regionais da base ecoinvent v3.10 serão usados para calcular inventários em diferentes localizações geográficas referentes à Usina Hidrelétrica Sinop (capítulo 5).

Conforme Maier (2017), usando a matriz principal 4.1, as matrizes individuais derivadas podem ser construídas como podem ser vistas a seguir (matrizes 4.2 e 4.3).

$$A_{I1} = \begin{pmatrix} & \text{T2P1} & \text{T3P1} & \text{T4P1} \\ \text{T2P1} & 0 & 0 & 0 \\ \text{T3P1} & x.x & 0 & 0 \\ \text{T4P1} & y.x & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

$$A_{I2} = \begin{pmatrix} & \text{T2P2} & \text{T3P1} & \text{T3P2} & \text{T3P3} & \text{T4P1} \\ \text{T2P2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{T3P1} & x.y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{T3P2} & y.y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{T3P3} & y.z & 0 & z.x & 0 & 0 \\ \text{T4P1} & 0 & z.z & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

A mesma abordagem foi adotada para a matriz ambiental. Para cada estágio do ciclo de vida, uma matriz ambiental individual B com os mesmos processos é utilizada para as matrizes AI (4.4) e (4.5), como mostrado a seguir.

$$B_{I1} = \begin{pmatrix} & \text{T2P1} & \text{T3P1} & \text{T4P1} \\ \text{Emissão 1} & 0 & z.z & 0 \\ \text{Emissão 2} & 0 & x.x & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

$$B_{I2} = \begin{pmatrix} & \text{T2P2} & \text{T3P1} & \text{T3P2} & \text{T3P3} & \text{T4P1} \\ \text{Emissão 1} & 0 & 0 & z.z & 0 & z.z \\ \text{Emissão 2} & x.y & 0 & y.y & 0 & x.x \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Por fim, as emissões acumuladas ao longo do tempo são mapeadas de acordo com sua ocorrência regional nos diferentes estágios do ciclo de vida. Os resultados são apresentados em mapas dinâmicos de emissões, que mostram visualmente como as emissões se acumulam por região e estágio ao longo do tempo. O resultado do inventário para cada uma dessas matrizes é apresentado em um mapa de inventário com todas as localizações indicadas.

Para se calcular as emissões no ar, no solo, na água e resíduos que integram o ICV de uma usina hidrelétrica com reservatório, seguindo o método ESPA^+ e usando a base de dados ecoinvent v3.10 como principal fonte de dados de inventário, é necessário seguir uma série de passos que envolvem a utilização

de conjuntos de dados de inventário do ciclo de vida (ICV) e a aplicação de modelos de sistema apropriados.

Utilizando-se ferramentas de modelagem como o *software* openLCA, cuja escolha para uso nesta pesquisa foi fundamentada na seção 3.2, pode-se realizar os passos descritos a seguir de maneira eficiente e obter uma análise detalhada das emissões no ar, no solo, na água e resíduos. Na sequência, com emprego de métodos de cálculo de impactos, como o Recipe2016, quantificam-se os impactos de pontos médios (*midpoints*) e finais (*endpoints*).

O Quadro 4.6 sintetiza os passos para calcular as saídas dos processos elementares em cada fase do ciclo de vida (i.e., produtos, emissões no ar, no solo, na água e resíduos), usando a base de dados ecoinvent v3.10 e o *software* de modelagem openLCA.

Quadro 4.6 – Cálculo das saídas dos processos elementares em cada fase do ciclo de vida de usina hidrelétrica com reservatório

Passo	Descrição
Seleção do conjunto de dados	Primeiramente, devem ser selecionados os conjuntos de dados relevantes da base ecoinvent v3.10, que representam os processos elementares por fase do ciclo de vida, que serão analisados. Cada conjunto de dados na base ecoinvent v3.10 representa um processo elementar com entradas e saídas (produtos, emissões no ar, no solo, na água e resíduos).
Escolha do modelo de sistema	A escolha do modelo de sistema depende do objetivo e escopo do estudo de ACV. Neste estudo, foi escolhido o modelo ' <i>substitution, consequential, long-term</i> ', por se tratar de uma ACV espaço-temporal de uma usina hidrelétrica com reservatório com vida útil de 60 anos.
Interligação dos conjuntos de dados	Os conjuntos de dados selecionados precisam ser interligados para formar um sistema de produto completo, como mostra a Figura 4.3. Isso envolve a identificação de todas as entradas intermediárias e a ligação dessas entradas aos processos de fornecimento apropriados. Na base de dados ecoinvent v3.10 isso é facilitado pelo uso de atividades de mercado que agregam produtos de diferentes fornecedores.
Cálculo de resultados acumulados	Uma vez que os conjuntos de dados estejam interligados, o próximo passo é calcular os resultados acumulados do inventário do ciclo de vida (ICV). Isso é feito seguindo as regras do modelo de sistema escolhido (no caso, o <i>consequential</i>). O cálculo envolve a inversão de matrizes para somar todas as trocas ambientais dos conjuntos de dados interligados.
Extração de emissões e resíduos	Após o cálculo dos resultados acumulados, é possível extrair as emissões no ar, no solo, na água e resíduos por fase do ciclo de vida. As emissões e resíduos são registrados como trocas elementares nos conjuntos de dados e incluem poluentes como CO ₂ , NO _x , SO ₂ , como exemplos de emissões no ar.

Para realizar os cálculos do ICV espaço-temporal, o *software* openLCA permite importar conjuntos de dados em formato de dados ecoSpold 2 oriundos da ecoinvent v3.10, configurar modelos de sistema e calcular resultados acumulados do ICV espaço-temporal. Apresentam-se os passos a serem seguidos através de um exemplo didático:

- Selecionar o conjunto de dados: *electricity production, hydro, reservoir*;
- Escolher o modelo de sistema: *Substitution, consequential, long-term*.
- Interligar conjuntos de dados: Requer a confirmação de que todas as entradas intermediárias (como construção da barragem, manutenção, etc.) estejam corretamente ligadas;
- Calcular resultados acumulados: Uso do *software* de modelagem openLCA para calcular os resultados acumulados. Definição da unidade funcional (1 kWh de eletricidade produzida);
- Analisar os resultados do ICV: O *software* openLCA permite realizar uma análise detalhada e transparente de cada fluxo elementar e suas emissões totais no ar, no solo, na água e resíduos. Além disso, o formato ecoSpold 2 fornece informações detalhadas sobre a qualidade dos dados, incertezas e metadados, que podem ser úteis para interpretar seus resultados e entender as limitações do estudo.

4.2.3

Fase 3: Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase do modelo de ACV espaço-temporal de sistemas de geração de energia hidrelétrica. Seu objetivo é prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de uma usina hidrelétrica com reservatório, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental.

A obtenção dos resultados dos impactos ambientais do sistema se dá pela aplicação dos fatores de caracterização (FC) no inventário de ciclo de vida, que traduzido matematicamente pode ser entendido como:

$$\vec{w} = F * \vec{v} \quad (4.6)$$

onde:

$\vec{w}$ é o vetor de impactos ambientais;

F é a matriz de FC em que cada linha corresponde a uma categoria de impacto e os fatores de caracterização de uma coluna modelam o impacto de uma substância para diferentes categorias;

$\vec{v}$ é o vetor de inventário de ciclo de vida.

Dessa forma, um meio de manter a variação espaço-temporal do ICV na obtenção dos impactos ambientais após a aplicação dos fatores de caracterização é organizar a matriz F de modo que ela também corresponda às localizações geográficas e aos períodos aplicados ao vetor v .

O método de escolha para cálculo dos impactos ambientais foi o ReCiPe 2016, como fundamentado no capítulo 3. Para realizar os cálculos dos impactos ambientais de uma usina hidrelétrica com reservatório com emprego do *software* de modelagem openLCA e o método ReCiPe2016, os seguintes passos devem ser seguidos:

- Configurar o método de avaliação de impacto: No *software* openLCA, selecionar o método ReCiPe2016;
- Escolher a perspectiva desejada (se hierárquica, individualista ou igualitária): no caso será a hierárquica;
- Calcular os impactos de pontos médios (*midpoints*): Executar o cálculo de impacto para o processo da usina hidrelétrica com reservatório, com os dados de inventário importados da base ecoinvent v3.10 no formato ecoSpold 2;
- Analisar os resultados para as 18 categorias de impacto de pontos médios (*midpoints*) definidos pelo método ReCiPe 2016;
- Calcular os impactos de pontos finais (*endpoints*), utilizando os fatores de caracterização de pontos médios para pontos finais, conforme os caminhos de danos (*damage pathways*) definidos pelo método ReCiPe 2016;
- Calcular os impactos nas três áreas de proteção: saúde humana, ecossistemas e recursos naturais;
- Normalização e ponderação (opcional): Aplicar os fatores de normalização do método ReCiPe 2016 para comparar os impactos em diferentes categorias. Se desejado, aplicar fatores de ponderação para agregar os resultados em um único indicador;

- Interpretar os resultados: Identificar as categorias de impacto mais significativas, analisando as principais contribuições para cada categoria de impacto;
- Comparar os resultados de ponto médio e ponto final para uma compreensão mais abrangente;
- Realizar análise de sensibilidade e incerteza: Variar os parâmetros-chave do inventário para avaliar a robustez dos resultados, utilizando as funcionalidades de análise de incerteza do *software* openLCA, se disponíveis.

4.2.4

Fase 4: Interpretação do ciclo de vida (AICV)

Como mencionado anteriormente, ao presumir homogeneidade espacial e temporal, os resultados tendem a apresentar um alto grau de agregação dos impactos potenciais, aumentando a incerteza. Assim, a observação dos resultados a partir de uma discretização temporal e espacial torna-se mais representativa.

A interpretação dos resultados com base no modelo proposto neste capítulo tende a reduzir as incertezas nas análises e ampliar as possibilidades de discussão, tais como: (i) identificar locais impactados anteriormente desconhecidos; (ii) determinar o ano de maior impacto ambiental, permitindo observar o fluxo elementar que o causou e discutir ações para mitigá-lo; (iii) variar os locais de obtenção das matérias-primas e observar como isso influencia os impactos ambientais, entre outras discussões possíveis.

É importante destacar que a ferramenta escolhida para a fase de modelagem (*software* openLCA) apresenta fatores regionais em seus fluxos elementares, desde que os dados geográficos sejam inseridos na etapa de inventário. Isso permite obter os impactos ambientais juntamente com as regiões mais impactadas, informação essa que é apresentada em formato de mapa pelo *software*, como será demonstrado na aplicação do modelo na Usina Hidrelétrica Sinop (capítulo 5).

4.3. Considerações finais sobre o capítulo

O modelo de avaliação de ciclo de vida (ACV) espaço-temporal proposto neste capítulo representa um avanço significativo na análise dos impactos ambientais de usinas hidrelétricas com reservatório em comparação aos estudos prévios sintetizados no Quadro 2.1. Ao incorporar dimensões espaciais e temporais detalhadas, o modelo oferece uma visão mais abrangente e precisa dos efeitos ambientais desses sistemas de geração de energia ao longo de todo o seu ciclo de vida.

A estrutura do modelo, baseada nas quatro fases definidas nas Normas NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009, fornece uma abordagem sistemática para a avaliação pretendida. A adoção da modelagem consequential permite considerar as implicações das escolhas e mudanças nas diferentes etapas do ciclo de vida das usinas hidrelétricas, desde a construção até o descomissionamento.

Um aspecto inovador do modelo é a definição detalhada das fronteiras espaciais e temporais do sistema. A consideração de um ciclo de vida que leve em consideração os períodos específicos para construção, operação e descomissionamento, permite uma análise mais realista dos impactos ao longo do tempo. Além disso, a inclusão de informações geográficas precisas para cada processo elementar possibilita a identificação de impactos localizados e a compreensão de como estes se distribuem espacialmente.

A utilização da base de dados ecoinvent v3.10 como principal fonte de informações para o inventário do ciclo de vida (ICV) garante dados atualizados e confiáveis. A aplicação do método ESPA+ (*Enhanced Structure Path Analysis*) para modelar o ICV espaço-temporal de usinas hidrelétricas com reservatórios representa uma contribuição para o avanço do conhecimento sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica, permitindo mapear as emissões e impactos de acordo com sua ocorrência regional e temporal.

A escolha do método ReCiPe2016 para a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) oferece uma análise abrangente, considerando 18 categorias de impacto nos pontos médios e três áreas de proteção nos pontos finais. A adoção da perspectiva hierárquica, com um horizonte temporal de 100 anos, alinha-se bem com o ciclo de vida das usinas hidrelétricas (tempo de vida útil 60 anos, no caso desta dissertação).

O modelo proposto também se destaca pela flexibilidade e capacidade de lidar com incertezas. A possibilidade de realizar análises de sensibilidade e a consideração de diferentes cenários permitem uma avaliação robusta dos resultados e a identificação de áreas críticas para melhoria.

A integração de ferramentas como o *software* openLCA para a modelagem e cálculos demonstra a aplicabilidade prática do modelo, facilitando sua adoção por pesquisadores e profissionais do setor.

É importante ressaltar que o modelo desenvolvido não apenas quantifica os impactos ambientais, mas também fornece uma base para a tomada de decisões mais informadas no planejamento e gestão de sistemas de geração hidrelétrica. A capacidade de identificar *hotspots* ambientais, tanto em termos de localização, quanto de tipo de impacto, pode orientar estratégias de mitigação mais eficazes.

Concluindo, o modelo de ACV espaço-temporal apresentado neste capítulo, quando aplicado na prática por empresas do setor elétrico e formuladores de políticas públicas no Brasil, tem o potencial de contribuir significativamente para o desenvolvimento mais sustentável do setor, alinhando-se com os objetivos globais de transição para fontes de energia mais limpas e renováveis. Futuros estudos e aplicações práticas deste modelo poderão fornecer insights importantes para o aprimoramento contínuo das práticas de geração hidrelétrica, considerando tanto os benefícios quanto os desafios ambientais associados a essa importante fonte de energia renovável.

5

Aplicação do modelo conceitual de ACV espaço-temporal na Usina Hidrelétrica Sinop

Neste capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados do estudo de avaliação de ciclo de vida (ACV) espaço-temporal da Usina Hidrelétrica Sinop (UHE Sinop), com o intuito de demonstrar a aplicabilidade e as vantagens do modelo proposto no capítulo anterior em relação à ACV convencional. Inicialmente, contextualiza-se o setor elétrico brasileiro, fornecendo o pano de fundo necessário para compreender o ambiente no qual a UHE Sinop opera. Em seguida, apresenta-se uma descrição detalhada da usina, abordando suas características técnicas, operacionais e ambientais. O cerne deste capítulo consiste na aplicação de dois modelos distintos de ACV à UHE Sinop: um modelo convencional, que não considera variações espaço-temporais, e o modelo espaço-temporal proposto no capítulo 4. Esta abordagem comparativa permite explorar as diferenças nos resultados obtidos pelos dois modelos, destacando como a incorporação de dimensões espaciais e temporais afeta a avaliação dos impactos ambientais.

5.1.

Descrição do sistema hidrelétrico de geração de energia

O objeto do estudo empírico será a Usina Hidrelétrica Sinop (UHE Sinop), localizada na bacia hidrográfica do Rio Teles Pires, no estado do Mato Grosso, região Centro-Oeste do Brasil. O acesso à hidrelétrica se dá pela BR 163 e de Cuiabá até o empreendimento hidrelétrico são percorridos cerca de 585 km. A Figura 5.1 apresenta a localização da UHE Sinop.

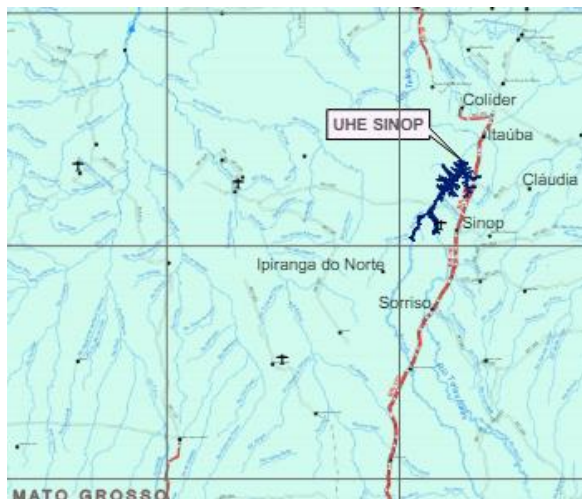


Figura 5.1 - Localização da UHE Sinop
Fonte: EPE (2010a).

A potência instalada da UHE Sinop é de 402 MW, gerando em média 1900 GWh/ano (EPE, 2010a) e atendendo a cerca de 1,5 milhão de pessoas. Sua construção se iniciou em 2014 e durou cerca de 5 anos, com sua operação se iniciando ao fim de 2018. Segundo estudo de viabilidade da UHE Sinop (EPE, 2010b), a área da usina possui perímetro de aproximadamente 1400 km e volume de cerca de 3,1 bilhões de m³, com tempo de renovação da água estimado em 35 dias.

Atualmente, a UHE Sinop possui 2 turbinas Kaplan, 2 unidades geradoras e reservatório de 342 km². A Figura 5.2 mostra a UHE Sinop.



Figura 5.2 - UHE Sinop
Fonte: Sinop Energia (2024).

5.2.

Proposições do estudo empírico

A partir da aplicação do modelo de avaliação espaço-temporal de ciclo de vida proposto no capítulo 4 na UHE Sinop e sua comparação com o modelo convencional (sem considerar parâmetros espaciais e temporais), busca-se responder as seguintes questões:

- Quais são os principais impactos ambientais decorrentes da UHE Sinop e em que etapa do ciclo de vida da usina estes impactos são mais expressivos?
- Em que ano do ciclo de vida da UHE Sinop ocorrem os maiores impactos ambientais? Eles são decorrentes de qual processo e fluxo elementar?
- Quais as diferenças, vantagens e desvantagens da aplicação do método de ACV espaço-temporal em relação à ACV convencional (sem a inclusão destes parâmetros)?

5.3.

Aplicação do modelo de ACV convencional à UHE

Nesta seção, é desenvolvida a avaliação de ciclo de vida da usina hidrelétrica com reservatório, objeto deste estudo empírico, a UHE Sinop, segundo a abordagem convencional, conforme as Normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009.

5.3.1.

Definição de objetivo e escopo

Quanto à aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo, as partes interessadas e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas para serem divulgadas publicamente, itens dispostos na Norma referentes ao escopo e que devem ser apresentados de forma clara em todos os estudos de ACV durante a definição de seu objetivo, este estudo empírico segue as premissas apresentadas no capítulo 4.

No caso da ACV convencional realizada, a aplicação pretendida é utilizar seus resultados para comparar com a variação metodológica proposta, que inclui parâmetros espaciais e temporais na ACV. O objeto de estudo são os sistemas hidrelétricos de geração de energia reservatório de acumulação (UHE), em especial, a UHE Sinop. Uma das principais razões para a realização do estudo é a necessidade de aumentar a confiabilidade do fornecimento de energia, às vistas da recente introdução de fontes intermitentes e da crise hidrológica dos últimos anos no Brasil. Quanto às partes interessadas, considera-se além dos órgãos ambientais brasileiros nas esferas federal, estadual e municipal, como o Ministério de Minas e Energia (MME) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), também a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e outras empresas e instituições, como as de geração e armazenamento de energia elétrica e de fornecimento de equipamentos e materiais para a construção das usinas.

Quanto ao escopo do estudo, também será considerado o apresentado no capítulo 4. Destaca-se que como unidade funcional (UF), é considerada 1 MWh de geração de energia elétrica e que as fronteiras do sistema serão consideradas do ‘berço ao túmulo’, tendo em conta as etapas de construção, operação e manutenção (O&M) e descomissionamento.

Importante salientar que a Figura 4.3 (capítulo 4) apresenta um fluxo de processos genérico para usinas hidrelétricas, de forma que há algumas variações entre ela e a Figura 5.3 a seguir. Isso se dá porque, como citado anteriormente, o projeto de uma UHE é consideravelmente dependente do seu local de implementação, já que alguns dos materiais são definidos a partir dos disponíveis no local, bem como as distâncias percorridas, em especial no transporte de funcionários e materiais. A Figura 5.3 apresenta o fluxo de referência e os limites do sistema de forma específica para a UHE Sinop, tratada neste estudo empírico.

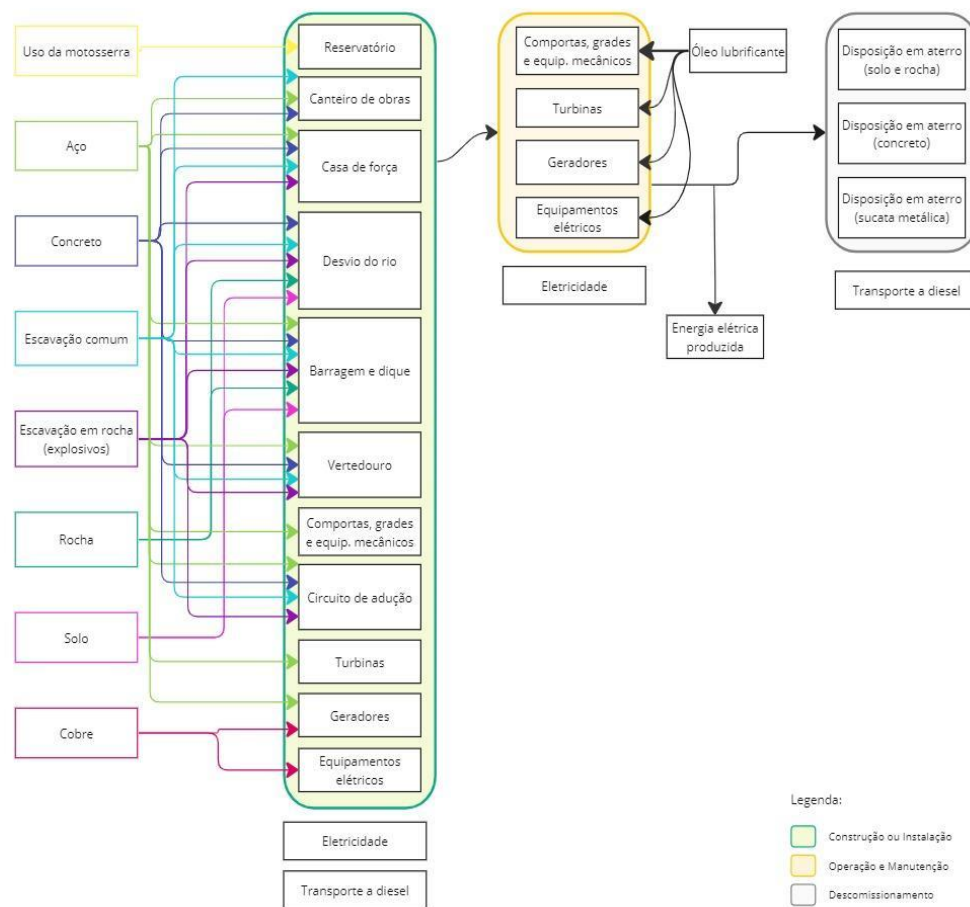


Figura 5.3 - Fluxo de referência da UHE Sinop
Fonte: Elaboração própria.

5.3.2. Análise de inventário do ciclo de vida

A coleta de dados do ICV referentes aos recursos materiais, ou seja, às entradas, conforme nomenclatura da Norma ABNT ISO NBR 14040:2009, seguiu duas etapas. Para a obtenção dos dados primários (aqueles provenientes da mensuração direta, cálculo ou estimativa do próprio sistema analisado) foram verificados relatórios e estudos realizados para a UHE Sinop, em especial disponibilizados pela empresa de consultoria PSR Soluções e Consultoria em Energia, além de o Projeto Básico Ambiental (PBA, 2013), o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) (EPE, 2010a) e os dados disponíveis no próprio site da usina. Já numa segunda etapa, quando a informação não foi disponibilizada especificamente para UHE Sinop, ela foi retirada da literatura e adequada para a UHE em questão (dados secundários). Os fluxos elementares de entrada, definidos como os recursos materiais, são apresentados na Tabela 5.1, bem como os fluxos elementares por UF (MWh), considerando uma geração média anual de 1 900 000 MWh, 95 000 000 MWh em 50 anos, conforme o RIMA da UHE Sinop (EPE, 2010a).

Estes fluxos elementares, da Tabela 5.1, foram obtidos com base nos dados disponíveis na base de dados ecoinvent v3.10. Foram considerados os fluxos que melhor se adequavam à UHE Sinop, objeto desta ACV, considerando seus fatores de emissões e caracterização definidos pela base de dados. O Apêndice A1 apresenta os fluxos elementares conforme nomenclatura da base de dados base ecoinvent v3.10.

Já as Tabelas 5.2 a 5.5 apresentam as emissões no ar, na água, no solo e os resíduos da UHE Sinop, respectivamente. Estas são as saídas do sistema e foram obtidas a partir de cada processo das fases de construção, operação e manutenção e descomissionamento da usina. Estes dados são explicitados como resultados após emprego do *software* openLCA e estão relacionados a cada um dos recursos presentes na cadeia de suprimentos dos fluxos elementares. Vale destacar que, por conta do considerável número de processos e de fluxos elementares empregados no estudo, há um expressivo número de saídas, de forma que as tabelas citadas apresentam as emissões mais relevantes, agregando as demais de acordo com sua unidade. Além disso, alguns itens aparecem diferenciados, como material particulado, por exemplo, dado para menor do que $2.5\ \mu m$, entre $2,5$ e $10\ \mu m$ e maior do que $10\ \mu m$. Por conta do considerável número de saídas, estas foram agregadas.

Tabela 5.1 – Recursos Materiais – Abordagem Convencional

Processo	Fluxo elementar	Unidade	Total (60 anos)	Total/UF	Premissa	Ref.
Construção						
Reservatório	Uso da motosserra	h	5,81E+06	6,12E-02	847 funcionários Nível 4 (operadores de motosserra), carga de trabalho 44 h semanais, 52 semanas por ano, 3 anos	PBA (2013), Quadro 3, página 47
Canteiro de obras	Concreto	m³	1,50E+04	1,58E-04	Notícias: “CANTEIRO DE OBRAS - Metade da concretagem da área de montagem é executada”	SINOP ENERGIA (2024)
	Escavação comum	m³	2,98E+05	3,13E-03	Considera a soma das áreas da central de concreto e de britagem, do pátio de armação e de carpintaria e outros ambientais de apoio	EPE (2010b)
	Aço	kg	1,13E+06	1,18E-02	Obtido da planilha de viabilidade da UHE Sinop. Densidade de 0,075 t/m³ de concreto.	EPE (2010b)
Casa de força	Escavação comum	m³	1,74E+06	1,83E-02	Soma dos valores de escavação comum escavação em rocha a céu aberto obtidos da planilha de viabilidade da UHE Sinop	EPE (2010b)
	Escavação em rocha (explosivo)	kg	2,10E+04	2,21E-04	Consumo mensal de cerca de 15 t (considerando 7 meses, conforme cronograma, 15 t x 7) e dividindo entre os 5 itens do ICV que utilizam explosivos	EPE (2010b), adaptado

Tabela 5.1 – Recursos Materiais – Abordagem Convencional (cont.)

Processo	Fluxo elementar	Unidade	Total (60 anos)	Total/UF	Premissa	Ref.
Casa de força	Concreto	m ³	1,33E+05	1,40E-03	Notícias: “CANTEIRO DE OBRAS - Metade da concretagem da área de montagem é executada”	SINOP ENERGIA (2024)
	Aço	kg	9,98E+06	1,05E-01	Obtido da planilha de viabilidade da UHE Sinop. Densidade de 0,075 t/m ³ de concreto.	EPE (2010b)
Desvio do rio	Escavação comum	m ³	Valor considerado no processo “vertedouro”, conforme fonte ¹⁶			
	Escavação em rocha (explosivo)	kg	2,10E+04	2,21E-04	Já explicitado no item da casa de força.	EPE (2010b), adaptado
	Concreto	m ³	4,00E+04	4,21E-04	Notícias: “CANTEIRO DE OBRAS - Metade da concretagem da área de montagem é executada”	SINOP ENERGIA (2024)
	Rocha (brita)	kg	2,44E+08	2,56E+00	152 189,825 m ³ de enrocamento, considerando brita arenária com densidade de 1600 kg/m ³	EPE (2010b), adaptado
	Solo	kg	1,94E+08	2,04E+00	114.031 m ³ de aterro para construção das ensecadeiras, considerando areia úmida de densidade de 1700 kg/m ³	EPE (2010b), adaptado
Barragem e dique	Escavação comum	m ³	1,97E+06	2,08E-02	Somatório de escavação comum e em rocha a céu aberto da planilha de viabilidade da UHE Sinop.	EPE (2010b)

¹⁶ O relatório disponibilizado pela empresa PSR Soluções e Consultoria em Energia (EPE, 2010b) o item considerado para escavação comum do desvio do rio com o valor considerado para vertedouro. Optou-se por manter desta forma no desenvolvimento do estudo.

Tabela 5.1 – Recursos Materiais – Abordagem Convencional (cont.)

Processo	Fluxo elementar	Unidade	Total (60 anos)	Total/UF	Premissa	Ref.
Barragem e dique	Escavação em rocha (explosivo)	kg	2,10E+04	2,21E-04	Já explicitado no item da casa de força.	EPE (2010b), adaptado
	Concreto	m³	1,10E+05	1,16E-03	Notícias: “CANTEIRO DE OBRAS - Metade da concretagem da área de montagem é executada” – soma dos valores de barragem e muros	SINOP ENERGIA (2024)
	Aço	kg	2,44E+06	2,57E-02	Soma dos itens ‘armadura’.	EPE (2010b)
	Rocha	kg	2,24E+08	2,36E+00	139 974 m³ de enrocamento, considerando brita arenária com densidade de 1600 kg/m³	EPE (2010b)
	Solo	kg	2,04E+08	2,15E+00	119 933 m³ de aterro para construção das ensecadeiras, considerando areia úmida de densidade de 1700 kg/m³	EPE (2010b)
Vertedouro	Escavação comum	m³	7,43E+05	7,82E-03	Somatório dos itens de escavação comum e em rocha a céu aberto da planilha de viabilidade da UHE Sinop.	EPE (2010b)
	Escavação em rocha (explosivo)	kg	2,10E+04	2,21E-04	Já explicitado no item da casa de força.	EPE (2010b), adaptado
	Concreto	m³	5,80E+04	6,11E-04	Notícias: “CANTEIRO DE OBRAS - Metade da concretagem da área de montagem é executada”	SINOP ENERGIA (2024)

Tabela 5.1 – Recursos Materiais – Abordagem Convencional

Processo	Fluxo elementar	Unidade	Total (60 anos)	Total/UF	Premissa	Ref.
Vertedouro	Aço	kg	7,00E+06	7,37E-02	Obtido da planilha de viabilidade da UHE Sinop. Item como armadura.	EPE (2010b)
Comportas/grades e equipamentos mecânicos	Aço	kg	5,65E+05	5,95E-03	Soma de valores obtidos ao longo do relatório.	EPE (2010b)
		kg	9,76E+04	1,03E-03	Soma de valores obtidos ao longo do relatório.	EPE (2010b)
		kg	2,46E+04	2,59E-04	Peso estimado do Pórtico Rolante de 24600 kg ¹⁷	EPE (2010b)
Circuito de adução/tomada d'água	Escavação comum	m ³	Valor considerado no processo “casa de força”, conforme fonte ¹⁸			
	Escavação em rocha (explosivo)	kg	2,10E+04	2,21E-04	Já explicitado no item da casa de força	EPE (2010b), adaptado
	Concreto	m ³	Valor considerado no processo “casa de força”, conforme fonte ²			
	Aço	kg	Valor considerado no processo “casa de força”, conforme fonte ²			
Turbinas	Aço	kg	2,64E+06	2,78E-02	Duas turbinas de 132000 kg	EPE (2010b), adaptado
Geradores	Aço	kg	8,00E+05	8,42E-03	Dois geradores de 40000 kg	EPE (2010b)
	Cobre	kg	7,83E+01	8,24E-07	A ref. apresenta o valor total de 5480 kg, que foi dividido entre os dois processos que consideram cobre, além de adaptado por meio dos fatores de capacidade	Ribeiro e Silva (2010), adaptado
Equipamentos elétricos	Cobre	kg	7,83E+01	8,24E-07	Explicado no item anterior.	Ribeiro e Silva (2010),

¹⁷ 1 kN é a força necessária para fazer uma balança indicar em torno de 100 kg.

¹⁸ Similar à nota 13.

Tabela 5.1 – Recursos Materiais – Abordagem Convencional (cont.)

Processo	Fluxo elementar	Unidade	Total (60 anos)	Total/UF	Premissa	Ref.
Transporte de funcionários	Transporte via ônibus	pessoa*km	4,35E+05	4,58E-03	Média da quantidade de trabalhadores mensais apresentados no Quadro 3, página 47 do PBA (1512), multiplicado pelo nº de meses trabalhados, conforme mesmo Quadro (36) * nº de semanas no mês (4) * duas viagens (ida e volta)	PBA (2013)
Transporte das turbinas e geradores	Transporte via caminhão	t*km	6,88E+06	7,24E-02	Turbinas e geradores saindo de Araraquara, conforme orientação da PSR em reunião do dia 20/03/2024 – cerca de 2.000 km	EPE (2010b), adaptado
Eletricidade	Eletricidade	kWh	7,54E+07	7,94E-01	Valor da referência, adaptado por meio dos fatores de capacidade	Ribeiro e Silva (2010), adaptado
O&M						
Turbinas	Óleo lubrificante	kg	3,90E+04	4,11E-04	Estoque mínimo de 115.000 L, segundo ref. Após adaptações pelo fator de capacidade, dividido entre os itens.	Soltovski (2017), adaptado
Geradores	Óleo lubrificante	kg	3,90E+04	4,11E-04	Explicado no item anterior	Soltovski (2017), adaptado
Comportas/grades e equipamentos mecânicos	Óleo lubrificante	kg	3,90E+04	4,11E-04	Explicado no item anterior	Soltovski (2017), adaptado
Equipamentos elétricos	Óleo lubrificante	kg	3,90E+04	4,11E-04	Explicado no item anterior	Soltovski (2017), adaptado

Tabela 5.1 – Recursos Materiais – Abordagem Convencional (cont.)

Processo	Fluxo elementar	Unidade	Total (60 anos)	Total/UF	Premissa	Ref.
Eletricidade	Eletricidade	kWh	1,35E+04	1,42E-04	Valor da referência, adaptado por meio dos fatores de capacidade	Ribeiro e Silva (2010), adaptado
Descomissionamento						
Disposição em aterro (solo e rocha)	Transporte via caminhão	t*km	6,71E+07	7,06E-01	Distância considerada entre o Aterro Sanitário de Sinop e UHE (77,5 km) e a soma dos pesos de cada item considerado	Reunião com a PSR realizada no dia 03/2024
Disposição em aterro (concreto)	Transporte via caminhão	t*km	6,90E+07	7,26E-01	Explicado no item anterior	Reunião com a PSR realizada no dia 03/2024
Disposição em aterro (sucata metálica)	Transporte via caminhão	t*km	3,20E+05	3,37E-03	Explicado no item anterior	Reunião com a PSR realizada no dia 03/2024

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.2 – Emissões no ar – Abordagem convencional

Emissões no ar	Unidade (UF)	Construção	O&M	Descomis.	Total
CO ₂	kg	3,14E+00	2,45E-03	2,22E-01	3,37E+00
Perda de calor	MJ	7,34E-01	1,30E-03	2,65E-02	7,61E-01
Azoto	kg	1,20E-01	9,26E-05	2,62E-03	1,22E-01
Água	m ³	3,00E-02	1,80E-05	7,62E-04	3,08E-02
Monóxido de carbono	kg	2,79E-02	4,68E-06	5,89E-04	2,85E-02
Antraceno	kg	2,47E-02	2,66E-06	2,35E-04	2,49E-02
NMVOC, compostos orgânicos voláteis não metano	kg	1,05E-02	4,51E-05	4,15E-04	1,10E-02
Metano, fóssil	kg	9,08E-03	2,27E-05	5,50E-04	9,65E-03
Material particulado	kg	8,61E-03	4,09E-06	5,65E-04	9,18E-03
Hidrocarbonetos alifáticos, alcanos, não especificados	kg	6,98E-03	6,39E-07	6,12E-05	7,04E-03
Cobalto II	kg	6,97E-03	6,57E-07	6,13E-05	7,03E-03
Óxidos de nitrogênio	kg	6,69E-03	4,65E-06	2,77E-04	6,97E-03
Dióxido de enxofre	kg	3,15E-03	5,36E-06	1,44E-04	3,30E-03
Óxidos de nitrogênio, BR	kg	2,03E-03	2,05E-08	5,42E-04	2,58E-03
Radon-220	kBq	1,22E-03	1,60E-06	5,81E-05	1,28E-03
Amônia	kg	7,32E-04	8,83E-08	1,83E-05	7,50E-04
Outras emissões (kBq)	kBq	-2,18E+01	-6,41E-03	9,54E-01	-2,09E+01
Outras emissões (kg)	kg	-2,18E+01	-6,41E-03	9,54E-01	-2,09E+01

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados obtidos com emprego do *software* openLCA.

Tabela 5.3 – Emissões no solo – Abordagem convencional

Emissões no solo	Unidade (UF)	Construção	O&M	Descomis.	Total
Óleos não fósseis	kg	5,52E-03	1,64E-09	8,88E-08	5,52E-03
Dióxido de carbono, para o solo ou estoque de biomassa	kg	1,38E-03	6,30E-09	1,52E-04	1,53E-03
Cálcio II	kg	2,03E-04	5,04E-07	1,39E-05	2,18E-04
Silício	kg	1,35E-04	6,59E-08	4,91E-06	1,40E-04
Carbono	kg	1,13E-04	4,05E-07	1,14E-05	1,25E-04
Alumínio III	kg	8,73E-05	1,35E-07	2,86E-06	9,03E-05
Óleos, não especificados	kg	7,85E-05	2,69E-07	7,16E-06	8,59E-05
Cloreto	kg	6,46E-05	3,88E-07	6,19E-06	7,12E-05
Sódio I	kg	3,70E-05	2,21E-07	3,86E-06	4,11E-05
Enxofre	kg	3,86E-05	8,34E-08	2,00E-06	4,07E-05
Potássio I	kg	3,56E-05	5,02E-08	1,96E-06	3,76E-05
Magnésio	kg	3,00E-05	9,49E-08	1,94E-06	3,21E-05
Tebutam	kg	2,14E-05	1,34E-14	2,07E-12	2,14E-05
Manganês II	kg	9,48E-06	8,40E-09	5,64E-07	1,01E-05
Bário II	kg	8,83E-06	5,46E-08	7,11E-07	9,60E-06
Zinco II	kg	6,61E-06	2,86E-09	1,48E-06	8,08E-06
Carbetamida	kg	7,67E-06	4,80E-15	7,40E-13	7,67E-06
Fósforo	kg	5,54E-06	7,63E-09	3,21E-07	5,87E-06
Perda de calor	MJ	-1,03E-01	2,56E-06	-1,14E-02	-1,15E-01
Outras emissões	kg	-1,47E-06	2,66E-07	-1,57E-06	-2,77E-06

Fonte: laboração própria, com base nos resultados obtidos com emprego do software openLCA.

Tabela 5.4 – Emissões na água – Abordagem convencional

Emissões na água	Unidade (UF)	Construção	O&M	Descomis.	Total
Perda de calor	MJ	1,51E-01	2,56E-04	4,62E-03	1,56E-01
Silício	kg	1,41E-01	2,23E-05	1,06E-03	1,42E-01
Sulfato	kg	6,99E-02	4,36E-05	1,97E-03	7,19E-02
Cálcio II	kg	4,10E-02	2,11E-05	1,06E-03	4,21E-02
Rádio-226	kBq	2,77E-02	1,56E-04	7,17E-03	3,50E-02
Sódio I	kg	2,02E-02	2,58E-05	2,20E-03	2,24E-02
Alumínio III	kg	1,58E-02	7,54E-06	3,19E-04	1,62E-02
Dicloreto de etileno	kg	1,58E-02	5,64E-06	1,40E-04	1,60E-02
Formaldeído	kg	1,13E-02	7,00E-06	3,06E-04	1,16E-02
Nitrato	kg	6,46E-03	5,44E-07	3,19E-04	6,78E-03
Potássio I	kg	6,37E-03	4,33E-06	1,82E-04	6,55E-03
Rádio-228	kBq	4,76E-03	2,58E-05	1,16E-03	5,94E-03
Ácido fluossilícico	kBq	4,55E-03	2,45E-05	1,11E-03	5,68E-03
Tório-228	kBq	9,52E-04	5,16E-06	2,31E-04	1,19E-03
Íon cobre	kg	7,95E-04	2,85E-07	1,33E-05	8,08E-04
Outras emissões (kg)	kg	3,27E-03	1,76E-06	7,13E-05	3,34E-03
Outras emissões (kBq)	kBq	2,18E-04	1,51E-07	1,89E-04	4,07E-04

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados obtidos com emprego do *software* openLCA.

Tabela 5.5 – Resíduos – Abordagem convencional

Resíduos	Unidade (/UF)	Construção	O&M	Descomis.	Total
Massa de resíduos, total, colocada em aterro	kg	8,92E+07	1,21E+04	7,88E+05	9,00E+07
Resíduos perigosos descartados	kg	8,64E+07	1,05E+04	7,71E+05	8,72E+07
Carbono orgânico, colocado em aterro	kg	4,40E+05	4,59E+02	1,59E+04	4,56E+05
Resíduos não perigosos descartados	kg	-1,02E+08	5,16E+04	-6,35E+06	-1,09E+08

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados obtidos com emprego do *software* openLCA.

5.3.3.

Avaliação do impacto do ciclo de vida

Quanto ao método de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) escolhido, optou-se pelo ReCiPe2016, método de destaque nos estudos sobre ACV de fontes de energia elétrica, segundo sua perspectiva hierárquica (H), com horizonte de tempo de 60 anos, sendo 50 anos de operação da UHE.

Como apresentado anteriormente, o estudo considerou as abordagens *midpoint* e *endpoint* do método ReCiPe2016, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7, respectivamente.

O Apêndice A2 apresenta os conceitos e as unidades de medidas para cada uma das categorias de impactos (*midpoints*) do método ReCiPe2016.

Tabela 5.6 – Resultado dos impactos ambientais nos pontos intermediários (*midpoints*)

Categoria de impacto (<i>midpoint</i>)	Unidade	Construção		O&M		Descomissionamento		Total	
		Resultado (60 anos)	Resultado /UF	Resultado (60 anos)	Resultado /UF	Resultado (60 anos)	Resultado /UF	Resultado (60 anos)	Resultado/UF
Acidificação terrestre	kg SO ₂ -eq	6,50E+05	6,84E-03	6,81E+02	7,17E-06	2,64E+04	2,78E-04	6,77E+05	7,13E-03
Mudanças climáticas	kg CO ₂ -eq	3,02E+08	3,18E+00	3,05E+05	3,21E-03	2,06E+07	2,17E-01	3,23E+08	3,40E+00
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB-eq	2,70E+07	2,84E-01	9,15E+03	9,63E-05	5,85E+05	6,16E-03	2,76E+07	2,91E-01
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB-eq	7,98E+07	8,40E-01	1,67E+04	1,76E-04	1,38E+06	1,45E-02	8,12E+07	8,54E-01
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB-eq	4,19E+10	4,41E+02	4,52E+06	4,76E-02	7,36E+08	7,75E+00	4,26E+10	4,49E+02
Escassez de recursos fósseis	kg óleo-eq	6,45E+07	6,79E-01	2,38E+05	2,50E-03	6,42E+06	6,76E-02	7,12E+07	7,49E-01
Eutrofização de água doce ¹⁹	kg P-eq	4,42E+04	4,65E-04	6,24E+01	6,56E-07	-4,19E+03	-4,41E-05	4,00E+04	4,22E-04
Eutrofização marinha	kg N-eq	4,10E+04	4,32E-04	7,52E+00	7,91E-08	2,26E+03	2,38E-05	4,33E+04	4,55E-04
Toxicidade humana carcinogênica	kg 1,4-DCB-eq	1,58E+08	1,66E+00	2,30E+03	2,42E-05	8,66E+05	9,12E-03	1,59E+08	1,67E+00
Toxicidade humana não-carcinogênica	kg 1,4-DCB-eq	3,80E+08	4,00E+00	2,45E+05	2,58E-03	1,65E+07	1,74E-01	3,97E+08	4,18E+00
Radiação ionizante	kBq Co-60-eq	-2,65E+06	-2,79E-02	-7,80E+02	-8,22E-06	1,16E+05	1,23E-03	-2,53E+06	-2,66E-02
Uso da terra	m ² *a crop-eq	2,79E+07	2,93E-01	7,33E+03	7,71E-05	2,10E+06	2,21E-02	3,00E+07	3,16E-01
Escassez de recursos minerais	kg Cu-eq	1,07E+07	1,13E-01	1,46E+03	1,53E-05	9,16E+04	9,64E-04	1,08E+07	1,14E-01
Depleção de ozônio estratosférico	kg CFC-11-eq	1,66E+02	1,75E-06	6,88E-02	7,25E-10	8,50E+00	8,95E-08	1,75E+02	1,84E-06
Formação de material particulado	kg PM _{2,5} -eq	4,89E+05	5,15E-03	3,54E+02	3,73E-06	2,03E+04	2,14E-04	5,10E+05	5,37E-03
Formação de ozônio (saúde humana)	kg NO _x -eq	8,84E+05	9,31E-03	1,22E+03	1,29E-05	3,44E+04	3,62E-04	9,20E+05	9,68E-03
Formação de ozônio (ecossistemas terrestres)	kg NO _x -eq	1,04E+06	1,09E-02	1,70E+03	1,79E-05	3,93E+04	4,14E-04	1,08E+06	1,13E-02
Consumo de água	m ³	2,85E+06	3,00E-02	1,71E+03	1,80E-05	7,24E+04	7,62E-04	2,93E+06	3,08E-02

Fonte: Elaboração própria, com base nos fluxos elementares inseridos da base de dados ecoinvent v3.10 e resultados gerados pelo método ReCiPe2016.

¹⁹ Considera a aplicação de créditos por mitigar impactos. É uma consideração realizada em estudos que aplicam modelagem consequential.

Tabela 5.7 – Resultado dos impactos nos pontos finais (*endpoints*)

Área de Proteção	Categoria de Impacto	Unidade	Construção		O&M		Descomissionamento	
			Resultado	Resultado/UF	Resultado	Resultado/UF	Resultado	Resultado/UF
Ecossistemas	Acidificação terrestre	espécies.ano	1,38E-01	1,45E-09	1,44E-04	1,52E-12	5,60E-03	5,89E-11
	Mudanças climáticas		2,31E-05	2,43E-13	2,33E-08	2,45E-16	1,58E-06	1,66E-14
	Mudanças climáticas		8,46E-01	8,91E-09	8,54E-04	8,99E-12	5,78E-02	6,08E-10
	Ecotoxicidade de água doce		1,87E-02	1,97E-10	6,34E-06	6,67E-14	4,05E-04	4,26E-12
	Ecotoxicidade marinha		8,38E-03	8,82E-11	1,76E-06	1,85E-14	1,45E-04	1,52E-12
	Ecotoxicidade terrestre		4,78E-01	5,03E-09	5,16E-05	5,43E-13	8,39E-03	8,83E-11
	Eutrofização de água doce		2,95E-02	3,11E-10	4,18E-05	4,40E-13	-2,81E-03	-2,96E-11
	Eutrofização marinha		6,97E-05	7,33E-13	1,28E-08	1,35E-16	3,84E-06	4,05E-14
	Uso da terra		2,47E-01	2,60E-09	6,50E-05	6,84E-13	1,86E-02	1,96E-10
	Formação de ozônio (ecossistemas terrestres)		1,34E-01	1,41E-09	2,19E-04	2,31E-12	5,07E-03	5,33E-11
	Consumo de água (ecossistemas aquáticos)		1,72E-06	1,81E-14	1,03E-09	1,09E-17	4,37E-08	4,60E-16
	Consumo de água (ecossistemas terrestres)		3,85E-02	4,06E-10	2,31E-05	2,43E-13	9,77E-04	1,03E-11
Saúde Humana	Mudanças climáticas	DALYs ²⁰	2,80E+02	2,95E-06	2,83E-01	2,98E-09	1,91E+01	2,02E-07
	Toxicidade humana carcinogênica		5,25E+02	5,52E-06	7,63E-03	8,03E-11	2,87E+00	3,03E-08
	Toxicidade humana não-carcinogênica		8,67E+01	9,13E-07	5,59E-02	5,88E-10	3,76E+00	3,96E-08
	Radiação ionizante		-2,24E-02	-2,36E-10	-6,62E-06	-6,97E-14	9,88E-04	1,04E-11
	Depleção da camada de ozônio		8,83E-02	9,29E-10	3,65E-05	3,85E-13	4,51E-03	4,75E-11
	Formação de material particulado		3,08E+02	3,24E-06	2,23E-01	2,34E-09	1,28E+01	1,34E-07
	Formação de ozônio (saúde humana)		8,05E-01	8,47E-09	1,11E-03	1,17E-11	3,13E-02	3,29E-10
	Consumo de água	DALYs ³	6,34E+00	6,67E-08	3,80E-03	4,00E-11	1,61E-01	1,69E-09

²⁰ Disability Adjusted Life Year (DALY). Ou seja, ano de vida sadia perdido.

Tabela 5.7 – Resultado dos impactos nos pontos finais (*endpoints*) (cont.)

Área de Proteção	Categoria de Impacto	Unidade	Construção		O&M		Descomissionamento	
			Resultado	Resultado/UF	Resultado	Resultado/UF	Resultado	Resultado/UF
Recursos Naturais	Escassez de recursos fósseis	Dólar Americano (2013) ²¹	1,77E+07	1,86E-01	9,85E+04	1,04E-03	2,66E+06	2,80E-02
	Escassez de recursos minerais		2,47E+06	2,60E-02	3,37E+02	3,54E-06	2,12E+04	2,23E-04
Total	Ecossistemas	espécies.ano	1,94E+00	2,04E-08	1,41E-03	1,48E-11	9,42E-02	9,91E-10
	Saúde Humana	DALYs	1,21E+03	1,27E-05	5,74E-01	6,04E-09	3,88E+01	4,08E-07
	Recursos Naturais	Dólar Americano (2013)	2,01E+07	2,12E-01	9,88E+04	1,04E-03	2,68E+06	2,82E-02

Fonte: laboração própria, com base nos fluxos elementares inseridos da base de dados ecoinvent v3.10 e resultados gerados pelo método ReCiPe2016.

²¹ O impacto do esgotamento dos recursos é expresso em dólares americanos, uma vez que é quantificado o aumento de custos devido à extração mineral e fóssil. Ou seja, os fatores do ponto médio ao ponto final equivalem ao potencial de custo excedente absoluto (em USD2013/kg de Cu), obtido a partir de Vieira et al. (2016a), conforme RIVM (2017).

5.3.4. Interpretação do ciclo de vida

Seguindo as recomendações da ABNT ISSO NBR 14040 (2009), a interpretação do ciclo de vida se inicia com a avaliação do inventário de ciclo de vida. Diferentes fontes e algumas premissas precisaram ser adotadas para a obtenção do ICV final, conforme apresentadas na Tabela 5.1. Destaca-se que os recursos materiais nesta tabela decorreram de reuniões, estudos sobre a usina e relatórios disponíveis, porém, alguns fluxos foram retirados na literatura, de outros estudos sobre usinas hidrelétricas, e adequados para utilização na UHE Sinop.

Desta forma, importante ter em mente que estas adaptações e limitações na disponibilidade de informações é um fator que insere incertezas nos resultados, os quais devem ser analisados considerando-se potenciais impactos e não correspondendo aos impactos exatos do sistema avaliado.

Por sua vez, a análise das Tabelas 5.2 a 5.5, referentes às saídas, apresentou considerável variação em relação aos compostos para cada categoria de emissão (ar, solo e água), porém, é possível observar que perda de calor aparece tanto em emissões no ar quanto no solo, além de apresentar alguns compostos de carbono, como CO e CO₂. Além disso, ao comparar as emissões e os resíduos para cada etapa do ciclo de vida (construção, O&M e descomissionamento), fica clara a influência da etapa de construção nas emissões e, por consequência, nas categorias de impacto ambiental.

A análise da Tabela 5.6, com os resultados das categorias de impacto ambientais (*midpoint*) corrobora com a análise das saídas do ICV, uma vez que pesenta que a etapa de construção da usina hidrelétrica é a de maior impacto do ciclo de vida do empreendimento, seguida da etapa de descomissionamento e por fim, a etapa de operação e manutenção (O&M). Para todas as categorias de impacto ambiental, a etapa de construção se apresentou com mais de 90 % do total dos impactos.

Já a etapa de descomissionamento, que considera o transporte dos materiais como concreto, aço e solo, utilizados na construção da usina, para disposição em aterro, representou, em média, cerca de 4 %²² dos impactos

²² Os impactos 'eutrofização de água doce' e 'radiação ionizante' foram desconsiderados neste cálculo, por apresentar valores negativos, conforme nota de rodapé da Tabela 5.6.

ambientais do ciclo de vida da usina. Esse resultado é de suma importância para incentivar que mais estudos insiram esta etapa do ciclo de vida em suas análises, uma vez que ainda é pouco observada. A Tabela 5.8 apresenta, de forma detalhada, as porcentagens para cada uma das categorias de impacto *midpoint*, divididas entre as três etapas do ciclo de vida da UHE (construção, O&M e descomissionamento). Optou-se por excluir da análise os impactos ‘eutrofização de água doce’ e ‘radiação ionizante’, uma vez que apresentam valores negativos de impacto ao considerar a aplicação de créditos por mitigá-los. É uma consideração realizada em estudos que aplicam abordagem consequential.

Tabela 5.8 – Percentual de contribuição em cada uma das etapas (*midpoint*)

	Construção (%)	O&M (%)	Descomiss. (%)
Acidificação terrestre	96,0000%	0,1007%	3,8993%
Mudanças climáticas	93,5181%	0,0944%	6,3875%
Ecotoxicidade de água doce	97,8488%	0,0331%	2,1181%
Ecotoxicidade marinha	98,2814%	0,0206%	1,6979%
Ecotoxicidade terrestre	98,2635%	0,0106%	1,7259%
Escassez de recursos fósseis	90,6457%	0,3341%	9,0203%
Eutrofização marinha	94,7543%	0,0174%	5,2283%
Toxicidade humana carcinogênica	99,4535%	0,0014%	0,5451%
Toxicidade humana não-carcinogênica	95,7843%	0,0617%	4,1540%
Uso da terra	92,9780%	0,0244%	6,9976%
Escassez de recursos minerais	99,1371%	0,0135%	0,8494%
Depleção de ozônio estratosférico	95,0989%	0,0394%	4,8617%
Formação de material particulado	95,9481%	0,0694%	3,9825%
Formação de ozônio (saúde humana)	96,1323%	0,1330%	3,7348%
Formação de ozônio (ecossistemas terrestres)	96,1968%	0,1578%	3,6454%
Consumo de água	97,4700%	0,0585%	2,4714%
Média	96,0944%	0,0731%	3,8324%

Fonte: Elaboração própria com Bse nos resultados gerados pelo método ReCiPe2016.

Outros estudos (Ribeiro e da Silva, 2010; Raadal et al., 2011; San Miguel e Cerrato, 2020; Santoyo-Castelazo et al., 2011; Schomberg et al., 2022) corroboram com os resultados obtidos, demonstrando que a etapa de construção é a que dispõe das maiores contribuições para a carga ambiental da energia hidrelétrica, em especial por conta da utilização de aço, cimento e maquinário, conforme explica Ribeiro e da Silva (2010). De forma similar, Raadal et al. (2011) apresenta que uma das principais fontes de emissões para energia hidrelétrica são

atividades relacionadas à construção de barragens e diques, ou seja, à utilização de materiais de construção civil.

Considerando os impactos agregados, ou seja, a soma dos impactos para as etapas de construção, O&M e descomissionamento, a Figura 5.4 apresenta os 10 impactos mais relevantes, de acordo com o estudo empírico realizado. Observa-se que o impacto de maior valor foi a 'ecotoxicidade terrestre', que diz respeito à avaliação do potencial de dano aos ecossistemas terrestres pela exposição a substâncias tóxicas considerando organismos que vivem no solo, plantas e outras espécies terrestres, de forma a ilustrar os riscos apresentados para a biodiversidade terrestre. Considerando o impacto que uma UHE tende a ser para uma dada região, onde ela será implementada, em especial por conta das ações de supressão da vegetação necessárias (bem demonstrada pela utilização de motosserras para limpeza da área do reservatório), por exemplo, o resultado está de acordo com o esperado. Na sequência, tem-se como impactos relevantes 'toxicidade não carcinogênica' e 'mudanças climáticas', além de 'uso da terra' e 'escassez de recursos minerais' também serem consideráveis.

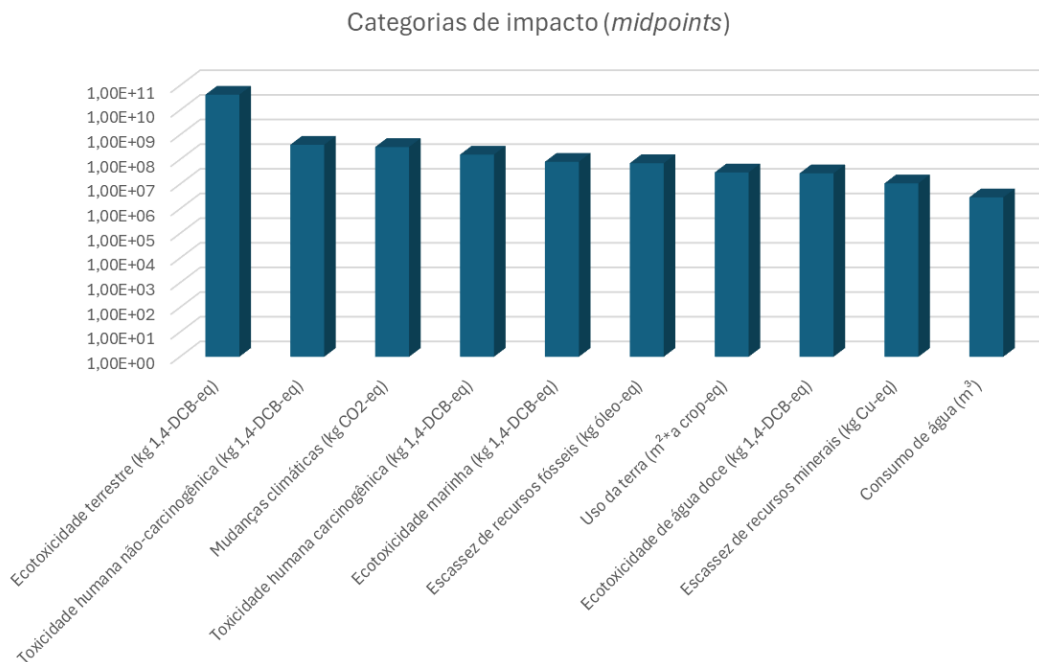


Figura 5.4 – Impactos nos pontos intermediários (*midpoints*) – 10 mais relevantes
 Fonte: Elaboração própria com base nos resultados gerados pelo método ReCiPe2016.

Conforme observado no Quadro 2.2, os valores dos impactos ambientais apresentam considerável variações, decorrentes de diversos fatores, em especial a capacidade instalada, a categoria da usina, o local de implementação e as premissas adotadas durante a definição do ICV. Vale destacar que as comparações precisam ser realizadas com base no valor por unidade funcional (UF).

Para fins de comparação dos resultados obtidos com a Literatura, considerou-se os estudos do Quadro 2.2 que melhor se adequavam com a usina objeto deste estudo empírico, ou sejam aqueles com UHE com reservatório e com potência da mesma ordem de grandeza da UHE Sinop, a saber: Atilgan e Azapagic (2016), Mahmud et al. (2019), Teffera et al. (2020) e UNECE (2022). Vale destacar que nem todos os estudos apresentaram as mesmas categorias de impacto.

Quanto ao potencial de mudanças climáticas, categoria de impacto presente em todos os estudos analisados, a ordem de grandeza se mostrou a mesma em todos. Para UHE Sinop, o valor obtido foi de 3,40 kg CO₂eq/MWh, conforme Tabela 5.2. Para Atilgan e Azapagic (2016), tem-se 8,30 kg CO₂eq/MWh, para Mahmud et al. (2019), 1,41 kg CO₂-eq/MWh (considerando o limite superior do resultado, conforme Quadro 2.2), Teffera et al. (2020), 30,70 kg CO₂eq/MWh, e por fim, UNECE (2022), 11 kg CO₂eq/MWh (também considerando o limite superior). As mudanças climáticas se apresentam como o terceiro impacto potencialmente mais relevante para a UHE Sinop, conforme Figura 5.4.

Outro impacto considerado entre os dez mais relevantes é o uso da terra, que avalia os impactos da transformação e ocupação do solo nos ecossistemas e na biodiversidade. Para a UHE Sinop, o valor obtido foi de 0,316 m²/MWh, mesma ordem do resultado de Teffera et al. (2020), de 0,69 m²/MWh.

O potencial de consumo da água avalia a potencial depleção de recursos de água doce por atividades humanas, considerando seus impactos nos ecossistemas aquáticos e no abastecimento para uso humano. Para o estudo empírico, o resultado foi 0,0308 m³/MWh, próximo ao valor expresso no estudo UNECE (2022), de 0,039 m³/MWh (limite superior).

Outras categorias de impacto consideradas no Quando 2.2, cujos resultados foram obtidos após aplicação do ReCiPe (2016) são: potencial de acidificação, de eutrofização e a formação do ozônio fotoquímico. Para estes casos, a Literatura apresenta os valores de 0,0003 kgSO₂eq/MWh (Atilgan e Azapagic, 2016) e 0,02 kgSO₂eq/MWh (Teffer et al., 2020) para o potencial de acidificação, 0,012 kgPO₄eq/MWh (Atilgan e Azapagic, 2016) e 0,00076 a 0,0013 kgPeq/MWh (UNECE, 2022) para potencial de eutrofização, e por fim, 0,0021 kgC₂H₄eq/MWh (Atilgan e Azapagic, 2016). Nenhum dos valores se desvia consideravelmente do obtidos neste estudo empírico.

Já o menor valor de impacto observado foi o de ‘depleção do ozônio estratosférico’, que corresponde a um aumento dos Raios Ultravioleta B (UVB), responsáveis pelas queimaduras e vermelhidão no corpo após a exposição ao sol, e por consequência, a um aumento na carga de doenças. Este aumento se dá por meio da emissão de clorofluorcarbonos (CFCs), pouco expressiva em usinas hidrelétricas e não observada nos estudos considerados para comparação.

Ao utilizar a abordagem consequencial, que permite a subtração das cargas ambientais referentes aos produtos evitados, similar à aplicação de créditos caso um impacto seja mitigado (Scachetti, 2016), a UHE observada apresentou dois resultados interessantes relacionados a este fato, nas categorias de impacto ‘eutrofização de água doce’ e ‘radiação ionizante’. Observando a Tabela 5.6 verifica-se que os itens aparecem com resultados negativos. Ao investigar tais razões por meio dos resultados entregues pelo método de AICV ReCiPe2016, verificou-se que para o impacto ‘eutrofização de água doce’, o valor tem forte influência do fluxo elementar ‘fósforo’, proveniente, em especial, de esgotos sanitários e detergentes domésticos derramados na água. Avaliando a dinâmica de reservatórios hidrelétricos e da abordagem consequencial, deduziu-se que a construção da UHE tende a mitigar tais poluentes na água (César et al., 2008), uma vez que promove o desenvolvimento da comunidade onde se insere, que inclui investimentos em infraestrutura, em especial, infraestrutura sanitária. Outro ponto interessante é a criação de UHE em estações de tratamento de esgoto, realidade em algumas partes do mundo, como Índia e Áustria.

Já em relação à categoria de impacto ‘radiação ionizante’, a abordagem consequencial, que considera o sistema de geração hidrelétrica inserido em um sistema dinâmico, orientado por mudanças, como tende a ser os sistemas elétricos

de um país, demonstra pelo seu valor menor do que zero que a construção de uma UHE tende a suprir a demanda de energia de forma a não ser necessária a implementação de outro empreendimento, que possivelmente iria ocasionar em maiores impactos relacionados a esta categoria, como a construção de usinas nucleares.

Os resultados apresentados na Tabela 5.7 e na Figura 5.5, referentes aos impactos nas áreas de proteção (*endpoint*) – Ecossistemas, Saúde Humana e Recursos Naturais – demonstram que os Recursos Naturais é a área mais impactada pelo sistema hidrelétricos. Isso se confirma ao observarmos que as categorias de impacto ‘escassez de recursos fósseis’ e ‘escassez de recursos minerais’ são as de maior impacto nas três fases observadas – construção, operação e manutenção (O&M) e descomissionamento.

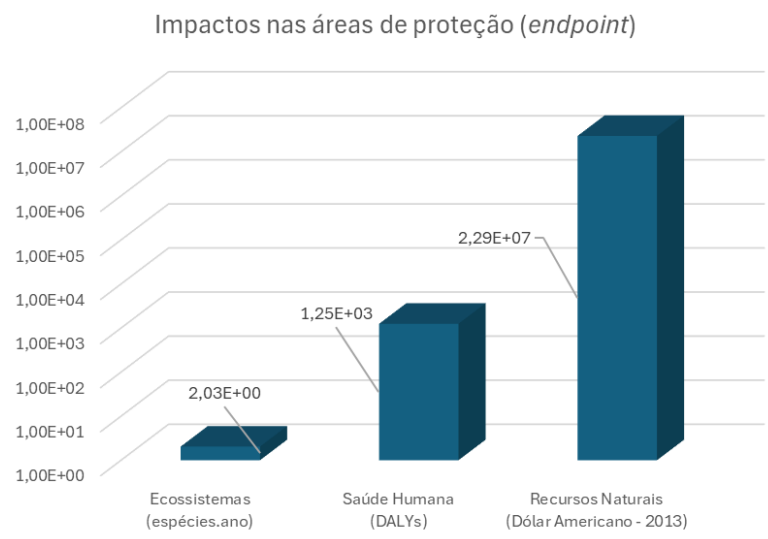


Figura 5.5 – Impactos nos pontos finais (*endpoints*)

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados gerados pelo método ReCiPe2016.

5.4.

Aplicação do modelo de ACV espaço-temporal à UHE

Esta seção tem por objetivo apresentar os resultados da ACV com a inclusão de parâmetros espaço-temporais na análise, conforme metodologia desenvolvida no capítulo 4. O estudo-empírico será aplicado a fim de validar o modelo proposto no e comparar com a metodologia convencional realizada na subseção 5.3.

5.4.1.

Definição de objetivo e escopo

Como discutido anteriormente, a usina hidrelétrica com reservatório Sinop (UHE Sinop) será avaliada segundo a abordagem espaço-temporal da ACV proposta no capítulo 4. O intuito do estudo é comparar os resultados desta abordagem com os obtidos a partir da ACV convencional, bem como apresentar as diferenças, vantagens e desvantagens de cada modelo.

A unidade funcional é 1 MWh de geração de energia elétrica, considerando-se uma geração média anual de 1 900 000 MWh, segundo o RIMA da UHE Sinop. A fronteira do sistema foi definida na fase de modelagem como sendo do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*), com limites considerando as seguintes fases do ciclo de vida: (i) construção, representando os cinco anos iniciais do ciclo de vida; (ii) operação e manutenção (O&M), com duração de 50 anos; (iii) descomissionamento, com duração de 5 anos, ao fim da vida útil da usina; (iv) transporte a diesel; e (v) uso da eletricidade.

O fluxo de referência (fluxo de processos) é o mesmo do apresentado na Figura 5.3, considerando-se a construção reservatório, do canteiro de obras, da casa de força, do desvio do rio, da barragem e do dique, do vertedouro, das comportas, grades e equipamentos mecânicos, do circuito de adução, das turbinas, do gerador e dos equipamentos elétricos, a utilização de óleo lubrificante na fase de manutenção, e o transporte até local de disposição de solo e rocha, concreto e sucata metálica no descomissionamento.

Porém, o horizonte temporal de 60 anos considerado para todo o ciclo de vida da UHE será observado a partir de uma discretização anual, de forma que os fluxos elementares e os processos são observados de acordo com seu ano de utilização ou construção, conforme Tabela 5.9. Os impactos nas áreas de proteção (*endpoint*) serão observadas de acordo com o país impactado. Esta discretização espacial é fornecida diretamente pelo *software* openLCA, utilizado neste estudo, por meio de mapas.

5.4.2.

Análise de inventário do ciclo de vida

A coleta de dados dos recursos materiais de entrada do ICV espaço-temporal foi semelhante à realizada para a ACV convencional. Também foi realizada uma primeira etapa para obtenção dos dados primários por meio de

relatórios e estudos sobre a UHE Sinop, por meio do seu Projeto Básico Ambiental (PBA), Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) e informações de seu site. Quando não obtidos os dados diretamente para a UHE Sinop, estes foram adaptados dos disponíveis da literatura (dados secundários). Porém, para a inclusão de parâmetros espaciais e temporais, mais uma etapa precisou ser considerada.

A partir da observação de cronogramas previstos e realizados de construção da UHE Sinop, bem como com auxílio de especialistas em estudos hidrelétricos, os fluxos elementares e fluxos de processos foram discretizados temporalmente considerando o passo de tempo anual, segundo uma função degrau discreta. Os fluxos de processo e os fluxos elementares foram observados das seguintes formas:

- Fluxos de processos (reservatório, canteiro de obras, desvio de rio, disposição em aterro etc. quantificados): foi observado em que momento da etapa do ciclo de vida da UHE cada um destes fluxos de processos é considerado (por exemplo, a casa de força, etapa de construção de hidrelétrica, é construída entre os anos de 2015 e 2017, não havendo ações para este processo nos anos de 2014 e 2018 – vide Tabela 5.9);
- Fluxos elementares (concreto, aço, rocha, transporte etc. quantificados): foram observados os momentos de utilização de cada um desses fluxos elementares durante as etapas de construção, O&M e descomissionamento (por exemplo, no desvio do rio, o concreto é utilizado apenas no ano inicial de construção e a rocha é requerida nos três anos iniciais – vide Tabela 5.9).

Essa divisão com base no passo de tempo (no caso, a escolhida para este trabalho foi a discretização anual) é válida uma vez que se pretende observar os impactos ambientais a cada ano do ciclo de vida da UHE. Vale destacar que o tempo zero considerado para o estudo foi o ano inicial de construção da UHE Sinop e que a soma dos valores dos fluxos elementares discretizados anualmente corresponde ao valor total aplicado na seção 5.3, para a ACV convencional, conforme elucidado no modelo do capítulo 4.

Respeitando a estrutura da metodologia proposta no capítulo 4, que busca substituir as matrizes tecnológica T e ambiental E , e o vetor de referência r , a

seguir é apresentada a Tabela 5.9, que mostra as distribuições temporais dos fluxos de processos e dos fluxos elementares, bem como apresenta as quantidades de cada processo e suas unidades de medidas. Estas quantidades são as consideradas para inclusão no *software* openLCA, visando obter a cadeia de atividades necessárias durante todo o ciclo de vida da UHE considerada.

Quanto à inclusão das questões espaciais, os locais foram inseridos diretamente no openLCA, na entrada de cada fluxo elementar. Como escolha de projeto, visando mitigar os impactos ambientais, considerou-se as origens das matérias primas, ou seja, dos fluxos elementares, como as regiões mais próximas da usina, em suma, região Centro-Oeste, estado do Mato Grosso, salvo quando os documentos ou especialistas informaram o local exato de obtenção do fluxo elementar, como o caso das turbinas e geradores que foram comprados na região Sudeste, na cidade de Araraquara, São Paulo. Deve-se ter em mente que, apesar de se considerar os locais mais próximos de obtenção dos fluxos elementares, tais fluxos são obtidos por meio de uma cadeia de produção, cujos insumos podem ser provenientes de outras regiões do mundo, de acordo com as informações disponibilizadas na base de dados ecoinvent v3.10.

Outra premissa que vale destaque é que foi considerado o transporte de funcionários apenas durante a etapa de construção da usina. Isso se deu pelo fato de que número de funcionários não é expressivo durante os períodos de operação e descomissionamento em comparação com o período de construção. Esta informação foi obtida por meio de especialistas em estudos de usinas hidrelétricas, os quais explicitaram que, atualmente, durante a operação, muitas das atividades são realizadas de forma remota.

As Tabelas 5.10 a 5.13 apresentam as emissões no ar, na água, no solo e os resíduos da UHE Sinop, respectivamente. Estas são as saídas do sistema e foram obtidas a partir de cada ano do ciclo de vida da UHE. Como citado anteriormente, os 5 primeiros anos são referentes à etapa de construção da usina, no ano de 6 ao 55 ocorre a operação da usina e, por fim, os 5 últimos anos, de 56 a 60, são o período de descomissionamento.

Similarmente ao explicitado na seção 5.3, referente às Tabelas 5.2-5.5, estas saídas são explicitadas como resultados após emprego do *software* openLCA e estão relacionadas a cada um dos recursos presentes na cadeia de suprimentos dos fluxos elementares.

Tabela 5.9 – Recursos materiais – Abordagem temporal

			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020-2067	2068	2069	2070-2072	2073
			CONSTRUÇÃO					O&M		DESCOMISSONAMENTO			
Processo	Fluxo elementar	Unid.	1	2	3	4	5	6	7-54	55	56	57-59	60
Reservatório	Uso da motosserra	h		7,99E+05	2,89E+06	2,11E+06							
Canteiro de obras	Concreto	m³	1,50E+04										
	Escavação comum	m³	2,98E+05										
	Aço	kg	1,13E+06										
Casa de força	Escavação comum	m³		1,74E+06									
	Escavação em rocha (TNT)	kg		1,80E+04	3,00E+03								
	Concreto	m³			1,70E+04	1,16E+05							
	Aço	kg			1,30E+06	8,68E+06							
Desvio do rio	Escavação comum	m³	. ²³										
	Escavação em rocha (TNT)	kg	2,10E+04										
	Concreto	m³	4,00E+04										
	Rocha	kg	8,12E+07	8,12E+07	8,12E+07								
	Solo	kg	6,46E+07	6,46E+07	6,46E+07								
Barragem e dique	Escavação comum	m³	9,87E+05	9,87E+05									
	Escavação em rocha (TNT)	kg		2,10E+04									
	Concreto	m³		2,97E+04	2,97E+04	5,06E+04							
	Aço	kg		6,60E+05	6,60E+05	1,12E+06							
	Rocha	kg		6,05E+07	6,05E+07	1,03E+08							
	Solo	kg		5,50E+07	5,50E+07	9,38E+07							
Vertedouro	Escavação comum	m³		7,43E+05									
	Escavação em rocha (TNT)	kg		2,10E+04									
	Concreto	m³		1,54E+04	1,54E+04	2,73E+04							
	Aço	kg		1,85E+06	1,85E+06	3,29E+06							
Comportas e equip. mecânicos	Aço	kg	5,65E+05		9,76E+04	2,46E+04							
Circuito de adução/tomada d'água	Escavação comum	m³		-									
	Escavação em rocha (TNT)	kg		2,10E+04									
	Concreto	m³		-	-								
	Aço	kg		-	-								
Turbinas	Aço	kg			8,80E+05	8,80E+05	8,80E+05						
Geradores	Aço	kg			2,67E+05	2,67E+05	2,67E+05						
Equipamentos elétricos	Cobre	kg			2,61E+01	2,61E+01	2,61E+01						
	Cobre	kg				3,91E+01	3,91E+01						

Tabela 5.9 – Recursos Materiais – Abordagem temporal (cont.)

²³ Valor incluído em vertedouro, conforme relatório EPE (2010b), disponibilizado pela PSR Soluções e Consultoria em Energia.

			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020-2067	2068	2069	2070-2072	2073
			CONSTRUÇÃO					O&M			DESCOMISSIONAMENTO		
Processo	Fluxo elementar	Unid.	1	2	3	4	5	6	7-54	55	56	57-59	60
Transporte	Transporte de funcionários	km	3,77E+04	9,84E+04	9,84E+04	1,00E+05	1,00E+05						
	Transporte de materiais	km			2,29E+06	2,29E+06	2,29E+06						
Eletricidade	Eletricidade	kWh	1,51E+07	1,51E+07	1,51E+07	1,51E+07	1,51E+07						
Turbinas	Óleo lubrificante	kg						7,80E+02	7,80E+02	7,80E+02			
Geradores	Óleo lubrificante	kg						7,80E+02	7,80E+02	7,80E+02			
Comportas/grades e equipamentos mecânicos	Óleo lubrificante	kg						7,80E+02	7,80E+02	7,80E+02			
Equipamentos elétricos	Óleo lubrificante	kg						7,80E+02	7,80E+02	7,80E+02			
Eletricidade	Eletricidade	kWh						7,80E+02	7,80E+02	7,80E+02			
Disposição em aterro (solo e rocha)	Disposição em aterro (solo e rocha)	km									1,34E+07	1,34E+07	1,34E+07
Disposição em aterro (concreto)	Disposição em aterro (concreto)	km									1,38E+07	1,38E+07	1,38E+07
Disposição em aterro (sucata metálica)	Disposição em aterro (sucata metálica)	km									6,40E+04	6,40E+04	6,40E+04

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.10 – Emissões no ar – Abordagem temporal

Emissões no ar	Unidade (UF)	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6-55	Ano 56-60	Total
CO2	kg	1,09E+01	1,23E+01	1,69E+01	4,89E+01	1,56E+00	6,17E-04	2,22E+00	1,02E+02
Perda de calor	MJ	8,94E-01	1,37E+00	1,85E+00	5,21E+00	1,90E-01	3,25E-04	2,65E-01	1,09E+01
Outras emissões (kg)	kg	6,46E-01	8,56E-01	1,45E+00	4,10E+00	5,51E-02	3,80E-05	4,53E-02	7,33E+00
Água	m3	3,00E-01	3,16E-01	3,46E-01	5,50E-01	2,37E-01	7,62E-06	7,62E-03	1,79E+00
Metano	kg	4,52E-02	5,17E-02	6,24E-02	1,77E-01	1,41E-02	5,88E-06	5,42E-03	3,78E-01
Óxidos de nitrogênio	kg	4,35E-02	5,90E-02	6,37E-02	1,55E-01	3,01E-03	1,31E-06	8,35E-03	3,66E-01
Hidrocarbonetos	kg	3,48E-02	3,68E-02	5,42E-02	1,72E-01	1,73E-03	1,62E-07	6,27E-04	3,03E-01
Dióxido de enxofre	kg	8,81E-03	1,15E-02	1,73E-02	4,93E-02	2,37E-03	1,00E-06	1,80E-03	9,83E-02
Material Particulado	kg	5,29E-03	6,98E-03	1,12E-02	3,27E-02	1,28E-03	1,50E-07	1,18E-03	6,33E-02
Óxidos de enxofre	kg	4,75E-03	3,90E-03	5,38E-03	1,68E-02	2,81E-06	3,64E-09	6,39E-06	3,08E-02
Amônia	kg	2,32E-03	2,97E-03	3,43E-03	6,35E-03	7,56E-05	2,21E-08	1,83E-04	1,61E-02
Etano	kg	3,61E-04	3,42E-04	5,00E-04	1,47E-03	2,21E-05	2,06E-08	1,41E-05	2,76E-03
Hexano	kg	1,22E-04	1,38E-04	1,87E-04	4,61E-04	2,67E-05	2,57E-08	1,89E-04	1,88E-03
Íon de ferro	kg	1,18E-04	1,50E-04	2,27E-04	6,80E-04	1,40E-05	1,74E-09	7,86E-05	1,58E-03
Benzeno	kg	6,68E-05	7,33E-05	1,57E-04	3,30E-04	7,57E-06	7,45E-09	1,52E-05	7,11E-04
Fluoreto de hidrogênio	kg	3,36E-05	4,55E-05	6,75E-05	1,97E-04	8,91E-06	3,43E-09	5,67E-06	3,81E-04
Íon cobre	kg	1,81E-05	2,05E-05	3,40E-05	8,61E-05	7,12E-06	5,76E-10	1,88E-05	2,60E-04
Chumbo II	kg	1,03E-05	1,25E-05	2,20E-05	5,80E-05	5,02E-06	1,15E-09	3,58E-06	1,26E-04
Xilenos	kg	6,36E-06	9,48E-06	1,39E-05	3,55E-05	3,40E-06	2,61E-09	3,62E-06	8,68E-05
Manganês II	kg	7,16E-06	7,26E-06	1,12E-05	3,27E-05	1,13E-06	2,66E-10	1,36E-06	6,63E-05
Íon estanho	kg	3,73E-06	3,83E-06	6,28E-06	1,66E-05	1,12E-06	9,67E-11	2,57E-06	4,44E-05
Nitrato	kg	1,51E-06	1,56E-06	2,24E-06	5,83E-06	2,40E-07	6,54E-11	1,82E-06	2,05E-05
Íon titânio	kg	1,58E-06	1,67E-06	2,28E-06	6,29E-06	1,62E-07	3,75E-11	1,59E-06	1,99E-05
Gases nobres, radioativos, não especificados	kBq	-1,55E+00	-3,36E+00	-9,27E+00	-3,01E+01	-3,02E+00	-2,11E-04	1,42E+00	-4,03E+01
Outras emissões (kBq)	kBq	-8,73E+00	-1,94E+01	-5,32E+01	-1,73E+02	-1,74E+01	-1,38E-03	8,13E+00	-2,31E+02

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados gerados pelo software openLCA.

Tabela 5.11 – Emissões no solo – Abordagem temporal

Emissões no solo	Unidade (UF)	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6-55	Ano 56-60	Total
CO ₂ , para o solo ou estoque de biomassa	kg	1,04E-03	9,44E-04	1,43E-03	3,64E-03	1,84E-04	1,56E-09	1,52E-03	1,48E-02
Alumínio	kg	1,01E-03	1,15E-03	1,38E-03	5,02E-03	9,47E-05	1,01E-07	8,59E-05	9,08E-03
Silício	kg	4,93E-04	5,38E-04	6,70E-04	2,46E-03	5,85E-05	1,65E-08	4,91E-05	4,46E-03
Cálcio II	kg	2,08E-04	3,20E-04	4,70E-04	1,13E-03	1,44E-04	1,26E-07	1,39E-04	2,97E-03
Carbono	kg	2,65E-04	3,43E-04	4,36E-04	1,20E-03	5,45E-05	1,01E-07	1,14E-04	2,87E-03
Íon de ferro	kg	2,35E-04	3,16E-04	3,86E-04	1,28E-03	2,54E-05	6,32E-08	-4,20E-05	2,03E-03
Cloreto	kg	1,35E-04	2,11E-04	2,45E-04	6,47E-04	2,97E-05	9,69E-08	6,19E-05	1,58E-03
Enxofre	kg	1,28E-04	1,51E-04	1,84E-04	6,34E-04	1,70E-05	2,08E-08	2,00E-05	1,22E-03
Óleos, não especificados	kg	8,44E-05	1,28E-04	1,23E-04	2,91E-04	1,09E-05	6,73E-08	7,16E-05	9,99E-04
Sódio I	kg	8,43E-05	1,28E-04	1,47E-04	4,00E-04	1,63E-05	5,52E-08	3,86E-05	9,72E-04
Outras emissões	kg	7,03E-05	9,17E-05	1,56E-04	3,59E-04	2,27E-05	8,42E-09	5,02E-05	9,51E-04
Potássio I	kg	5,48E-05	6,46E-05	9,82E-05	2,69E-04	2,40E-05	1,26E-08	1,96E-05	6,09E-04
Magnésio	kg	4,27E-05	6,34E-05	8,39E-05	2,24E-04	1,85E-05	2,37E-08	1,94E-05	5,30E-04
Bário II	kg	1,85E-05	2,93E-05	3,32E-05	9,00E-05	3,75E-06	1,36E-08	7,11E-06	2,11E-04
Chumbo II	kg	5,66E-07	6,16E-07	8,23E-07	2,31E-06	9,21E-08	5,11E-11	5,01E-07	6,92E-06
Ácido sulfúrico	kg	7,22E-07	1,40E-06	8,22E-07	1,36E-06	4,28E-09	1,87E-12	-3,90E-08	4,12E-06
Cádmio II	kg	3,23E-08	3,27E-08	4,71E-08	1,29E-07	6,37E-09	3,18E-12	1,13E-08	3,04E-07
Amônia	kg	4,22E-10	4,49E-10	5,94E-10	1,59E-09	4,20E-11	3,49E-13	1,84E-10	4,03E-09
Perda de calor	MJ	-5,57E-02	-5,24E-02	-8,59E-02	-2,03E-01	-1,49E-02	6,41E-07	-1,14E-01	-9,84E-01

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados gerado pelos *software* openLCA.

Tabela 5.12 – Emissões na água – Abordagem temporal

Emissões na água	Unidade (UF)	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6-55	Ano 56-60	Total
Água, diferentes localidades	m³	3,32E+01	3,25E+01	3,32E+01	4,16E+01	2,84E+01	5,34E-04	4,83E-01	1,71E+02
Outras emissões (kg)	kg	5,42E-01	7,92E-01	1,42E+00	3,93E+00	2,63E-01	4,59E-05	1,31E-02	7,01E+00
Perda de calor	MJ	1,67E-01	2,16E-01	2,55E-01	6,68E-01	2,59E-02	6,41E-05	4,62E-02	1,57E+00
Sódio I	kg	3,67E-02	4,84E-02	7,38E-02	1,91E-01	1,05E-02	6,45E-06	2,20E-02	4,71E-01
Íon de ferro	kg	2,43E-02	4,02E-02	6,73E-02	2,01E-01	8,58E-03	1,41E-06	1,40E-03	3,48E-01
Nitrato	kg	2,81E-03	3,14E-03	5,43E-03	1,32E-02	8,84E-04	1,36E-07	3,19E-03	4,14E-02
Íon cobre	kg	1,90E-03	3,07E-03	4,83E-03	1,50E-02	3,76E-04	7,14E-08	1,33E-04	2,59E-02
Íon titânio	kg	8,16E-04	1,29E-03	1,97E-03	6,10E-03	1,47E-04	3,45E-08	8,74E-05	1,08E-02
Íon estanho	kg	5,58E-05	9,38E-05	1,48E-04	4,64E-04	1,15E-05	2,72E-09	4,34E-06	7,94E-04
Íon arsênico	kg	1,86E-05	2,45E-05	3,95E-05	1,12E-04	4,55E-06	2,01E-09	2,97E-06	2,14E-04
Metanol	kg	8,72E-06	7,40E-06	1,03E-05	3,15E-05	1,33E-07	2,93E-10	8,74E-07	6,24E-05
Cianeto	kg	3,79E-06	6,82E-06	1,10E-05	3,53E-05	8,48E-07	-9,19E-11	-3,08E-07	5,62E-05
Fenol	kg	2,69E-06	2,82E-06	3,61E-06	1,04E-05	1,53E-07	9,45E-10	9,73E-07	2,46E-05
Mercurio II	kg	1,10E-06	1,80E-06	2,99E-06	8,98E-06	2,69E-07	7,26E-11	1,12E-07	1,57E-05
Cromo III	kg	5,16E-07	9,14E-07	1,32E-06	4,29E-06	3,12E-08	7,85E-11	1,27E-07	7,71E-06
Acetona	kg	5,41E-07	4,72E-07	6,17E-07	1,86E-06	-7,81E-09	2,20E-10	6,93E-08	3,84E-06
Cromo-51	kBq	-4,92E-08	-1,76E-07	-7,51E-07	-2,57E-06	-2,80E-07	-1,53E-11	1,52E-07	-3,06E-06
Sódio-24	kBq	-1,99E-07	-4,35E-07	-1,17E-06	-3,78E-06	-3,79E-07	-3,10E-11	1,74E-07	-5,09E-06
Cromo VI	kg	-1,23E-04	-1,21E-04	7,83E-05	-3,70E-04	2,86E-04	4,27E-10	1,18E-05	-1,91E-04
Outras emissões (kBq)	kBq	-6,77E-03	-7,91E-02	-4,68E-01	-1,64E+00	-1,83E-01	4,58E-05	2,00E-01	-1,38E+00

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados gerados pelo *software* openLCA.

Tabela 5.13 – Resíduos – Abordagem temporal

Resíduos	Unidade (UF)	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6-55	Ano 56-60	Total
Massa de resíduos, total, colocada em aterro	kg	1,13E+00	1,75E+00	3,33E+00	9,19E+00	8,01E-01	3,21E-05	8,29E-02	1,66E+01
Resíduos perigosos descartados	kg	1,10E+00	1,72E+00	3,30E+00	9,11E+00	7,84E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+01
Resíduos não perigosos descartados	kg	1,91E+00	1,63E+00	1,15E-01	4,55E+00	-1,05E+00	1,37E-04	-6,69E-01	3,82E+00
Carbono orgânico, colocado em aterro	kg	9,68E-03	1,27E-02	2,00E-02	5,73E-02	3,87E-03	1,21E-06	1,67E-03	1,12E-01

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados gerados pelo *software* openLCA

5.4.3.

Avaliação de impacto do ciclo de vida

A partir dos fluxos elementares dos recursos materiais discretizados anualmente, apresentados na Tabela 5.9, realizou-se a avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) para cada ano em questão, de forma que os impactos por ano puderam ser observados, com o objetivo de se obter uma ACV temporalmente distribuída.

Para a ACV espaço-temporal, também foi adotado o método de avaliação de impacto de ciclo de vida ReCiPe2016 segundo sua perspectiva hierárquica (H) e a partir das abordagens *midpoint* e *endpoint*, conforme apresentam as Tabelas 5.14 e 5.15 a seguir.

Tabela 5.14 – Resultado dos impactos ambientais nos pontos intermediários por ano por unidade funcional (UF) (*midpoints*)

		Construção					O&M	Descomissionamento
Categoria de impacto (<i>midpoint</i>)	Unidade	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6-55	Ano 56-60
Acidificação terrestre	kg SO ₂ -eq	2,50E-02	3,29E-02	3,94E-02	1,02E-01	2,33E-03	1,79E-06	2,78E-03
Mudanças climáticas	kg CO ₂ -eq	1,22E+01	1,40E+01	1,86E+01	5,40E+01	1,85E+00	8,11E-04	2,17E+00
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB-eq	6,34E-01	9,74E-01	1,65E+00	4,81E+00	1,69E-01	2,41E-05	6,16E-02
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB-eq	2,96E+00	3,60E+00	7,19E+00	1,73E+01	3,59E-01	4,41E-05	1,45E-01
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB-eq	2,12E+03	2,24E+03	3,22E+03	1,05E+04	1,28E+02	1,20E-02	7,75E+01
Escassez de recursos fósseis	kg óleo-eq	1,95E+00	2,57E+00	3,43E+00	9,67E+00	3,22E-01	6,25E-04	6,76E-01
Eutrofização de água doce	kg P-eq	1,71E-03	2,58E-03	4,86E-03	1,31E-02	6,84E-04	1,64E-07	-4,41E-04
Eutrofização marinha	kg N-eq	2,22E-04	2,58E-04	3,91E-04	9,83E-04	5,37E-05	1,98E-08	2,38E-04
Toxicidade humana carcinogênica	kg 1,4-DCB-eq	-8,90E-01	-8,62E-01	7,47E-01	-2,48E+00	2,24E+00	6,25E-06	9,12E-02
Toxicidade humana não-carcinogênica	kg 1,4-DCB-eq	8,19E+00	1,16E+01	1,91E+01	5,52E+01	2,21E+00	6,45E-04	1,74E+00
Radiação ionizante	kBq Co-60-eq	-1,29E-02	-2,89E-02	-7,95E-02	-2,59E-01	-2,61E-02	-2,04E-06	1,23E-02
Uso da terra	m ² *a crop-eq	8,03E-01	1,12E+00	1,35E+00	2,21E+00	1,09E-01	1,93E-05	2,21E-01
Escassez de recursos minerais	kg Cu-eq	2,02E-01	2,83E-01	4,99E-01	1,44E+00	8,59E-02	3,85E-06	9,64E-03
Depleção de ozônio estratosférico	kg CFC-11-eq	3,58E-06	5,98E-06	4,85E-06	1,06E-05	2,93E-07	1,81E-10	8,95E-07
Formação de material particulado	kg PM _{2,5} -eq	1,16E-02	1,61E-02	2,19E-02	5,65E-02	3,67E-03	9,33E-07	2,14E-03
Formação de ozônio (saúde humana)	kg NOx-eq	2,76E-02	4,32E-02	4,45E-02	1,05E-01	2,19E-03	3,22E-06	3,62E-03
Formação de ozônio (ecossistemas terrestres)	kg NOx-eq	3,07E-02	4,69E-02	4,94E-02	1,20E-01	2,41E-03	4,48E-06	4,14E-03
Consumo de água	m ³	3,00E-01	3,16E-01	3,46E-01	5,50E-01	2,37E-01	7,62E-06	7,62E-03

Fonte: Elaboração própria, com base nos fluxos elementares inseridos da base de dados ecoinvent v3.10 e resultados gerados com emprego do método ReCiPe2016.

Tabela 5.15 – Resultado dos impactos ambientais nos pontos finais por ano (*endpoints*)

Área de Proteção	Categoria de Impacto	Unid.	Construção					O&M	Descomissionamento
			Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6-55	Ano 56-60
Ecossistemas	Acidificação terrestre	espécie s.ano	5,30E-09	6,97E-09	8,35E-09	2,17E-08	4,93E-10	3,80E-13	5,89E-10
	Mudanças climáticas		9,34E-13	1,07E-12	1,42E-12	4,13E-12	1,41E-13	6,20E-17	1,66E-13
	Mudanças climáticas		3,42E-08	3,92E-08	5,21E-08	1,51E-07	5,17E-09	2,27E-12	6,08E-09
	Ecotoxicidade de água doce		4,39E-10	6,75E-10	1,14E-09	3,33E-09	1,17E-10	1,67E-14	4,26E-11
	Ecotoxicidade marinha		3,11E-10	3,79E-10	7,56E-10	1,81E-09	3,78E-11	4,64E-15	1,52E-11
	Ecotoxicidade terrestre		2,42E-08	2,56E-08	3,67E-08	1,19E-07	1,46E-09	1,36E-13	8,83E-10
	Eutrofização de água doce		1,15E-09	1,72E-09	3,25E-09	8,77E-09	4,58E-10	1,10E-13	-2,96E-10
	Eutrofização marinha		3,77E-13	4,39E-13	6,65E-13	1,67E-12	9,13E-14	3,37E-17	4,05E-13
	Uso da terra		7,13E-09	9,93E-09	1,20E-08	1,96E-08	9,68E-10	1,71E-13	1,96E-09
	Formação de ozônio (ecossistemas terrestres)		3,96E-09	6,05E-09	6,37E-09	1,54E-08	3,11E-10	5,77E-13	5,33E-10
	Consumo de água (ecossistemas aquáticos)		1,81E-13	1,91E-13	2,09E-13	3,32E-13	1,43E-13	4,61E-18	4,60E-15
	Consumo de água (ecossistemas terrestres)		4,05E-09	4,26E-09	4,67E-09	7,43E-09	3,21E-09	1,03E-13	1,03E-10

Fonte: Elaboração própria, com base nos fluxos elementares inseridos da base de dados ecoinvent v3.10 e resultados gerados com emprego do método ReCiPe2016.

Tabela 5.15 – Resultado dos impactos ambientais nos pontos finais por ano (*endpoints*) (cont.)

Área de proteção	Categoria de impacto	Unidade	Construção					O&M	Descomissionamento
			Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7
Saúde Humana	Mudanças climáticas	DALYs	1,13E-05	1,30E-05	1,73E-05	5,01E-05	1,71E-06	7,52E-10	2,02E-06
	Toxicidade humana carcinogênica		-2,96E-06	-2,86E-06	2,48E-06	-8,25E-06	7,45E-06	2,07E-11	3,03E-07
	Toxicidade humana não-carcinogênica		1,87E-06	2,65E-06	4,35E-06	1,26E-05	5,03E-07	1,47E-10	3,96E-07
	Radiação ionizante		-1,10E-10	-2,45E-10	-6,75E-10	-2,19E-09	-2,22E-10	-1,73E-14	1,04E-10
	Depleção da camada de ozônio		1,90E-09	3,17E-09	2,58E-09	5,61E-09	1,55E-10	9,62E-14	4,75E-10
	Formação de material particulado		7,27E-06	1,01E-05	1,38E-05	3,55E-05	2,31E-06	5,86E-10	1,34E-06
	Formação de ozônio		2,52E-08	3,93E-08	4,05E-08	9,60E-08	1,99E-09	2,93E-12	3,29E-09
	Consumo de água		6,66E-07	7,01E-07	7,68E-07	1,22E-06	5,27E-07	1,69E-11	1,69E-08
Recursos Naturais	Escassez de recursos fósseis	Dólar Americano (2013)	4,68E-01	6,79E-01	8,00E-01	2,12E+00	8,29E-02	2,59E-04	2,80E-01
	Escassez de recursos minerais		4,66E-02	6,55E-02	1,15E-01	3,33E-01	1,99E-02	8,89E-07	2,23E-03
Total	Ecossistemas	espécies.a no	8,07E-08	9,48E-08	1,25E-07	3,49E-07	1,22E-08	3,77E-12	9,91E-09
	Saúde humana	DALYs*	1,82E-05	2,37E-05	3,87E-05	9,13E-05	1,25E-05	1,53E-09	4,08E-06
	Recursos naturais	Dólar Americano (2013)	5,14E-01	7,45E-01	9,15E-01	2,46E+00	1,03E-01	2,60E-04	2,82E-01

Fonte: Elaboração própria, com base nos fluxos elementares inseridos da base de dados ecoinvent v3.10 e resultados gerados com emprego do método ReCiPe2016.

Com base nos impactos nas áreas de proteção, observados após a aplicação do método ReCiPe2016 *endpoint*, os mapas a seguir apresentam os locais de maior impacto ambiental para cada área de proteção – Ecossistema, Saúde Humana e Recursos Naturais. Como exemplo, apresentam-se os mapas para o ano 1 do ciclo de vida da UHE Sinop. Os demais mapas se encontram no Apêndice A3.

Ano 1 (etapa de construção)



Figura 5.6 – Locais impactados para a área de proteção “Ecossistema” no ano 1
Fonte: Resultados gerados com emprego do método ReCiPe2016.



Figura 5.7 – Locais impactados para a área de proteção “Saúde Humana” no ano 1
Fonte: Resultados gerados com emprego do método ReCiPe2016.



Figura 5.8 – Locais impactados para a área de proteção “Recursos Naturais” no ano 1
Fonte: Resultados gerados com emprego do método ReCiPe2016.

5.4.4. Interpretação do ciclo de vida

Conforme determina a ABNT ISO NBR 14040:2009, inicia-se a interpretação do ciclo de vida a partir da observação do ICV, apresentado na subseção 5.4.2 para o caso espaço-temporal.

Durante a escolha do fluxo elementar na base de dados ecoinvent v3.10, optou-se por fluxos cujos desenvolvimentos foram feitos para os locais mais próximos do UHE (região Centro-Oeste do Brasil ou Brasil, quando apenas este era disponível), salvo quando não havia esta opção. Neste caso, foram considerados fluxos globais (GLO), sem um local definido e generalizado para todo o mundo.

Quanto às saídas (emissões e resíduos), a emissão de CO₂ no ar e no solo se destacou, bem como ‘água, em diferentes localidades’, na categoria ‘emissões na água’. Além disso, os cinco primeiros anos do ciclo de vida da usina, referentes a etapa de construção, se destacam quanto às emissões também para a abordagem espaço-temporal. Nesta abordagem, é possível observar anualmente qual o maior emissor, para cada categoria considerada, bem como para os resíduos de saída. Assim, observa-se que o ano 4, para os compostos de índices mais altos de emissão em cada categoria (ar, solo e água), se mostrou como o ano de valor mais elevado.

A partir da Tabela 5.14, com os resultados das categorias de impacto intermediário (*midpoint*), observa-se que o ano 4 despontou como o ano de maior impacto ambiental em 16 das 18 categorias, corroborando com a análise apresentada para as emissões de saída. Investigando esse achado, verificou-se a partir da Tabela 5.9 que este foi o ano de maior utilização de concreto, rocha, aço e solo, fluxos elementares cuja produção apresenta considerável impacto, em especial, se tratando de concreto e aço. Apesar de não haver estudos temporalmente distribuídos para comparação exata, o resultado corrobora com o explicitado para a ACV convencional, cujos materiais de construção civil de mostram como os mais relevantes nos impactos ambientais, com a etapa de construção, que ocorre nos 5 primeiros anos da ACV, despontando como a maior carga ambiental.

Em relação aos impactos nas áreas de proteção (*endpoints*), a distribuição em todos os anos é similar à Figura 5.9, referente ao ano 1, e expressa aqui como

exemplo. Como esperado, por conta do resultado obtido para a ACV convencional, a área de proteção ‘Recursos Naturais’ foi a mais impactada.

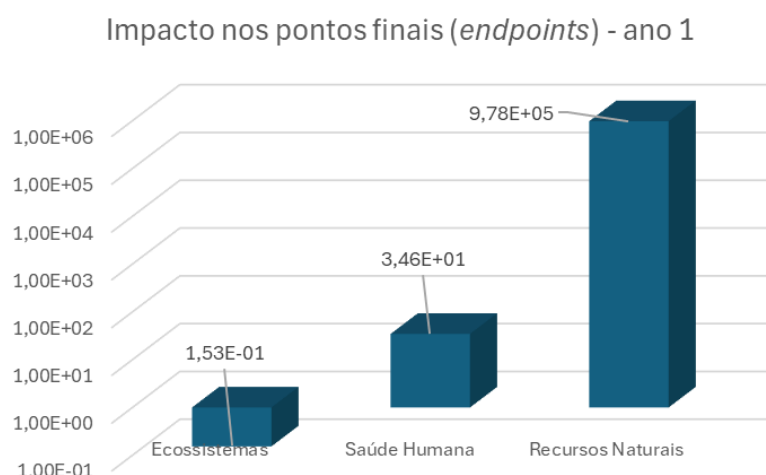


Figura 5.9 – Impactos nas áreas de proteção – ano 1

Fonte: Resultados gerados com emprego do método ReCiPe2016.

Uma forma interessante de apresentação dos resultados disponibilizada pelo OpenLCA é com base no processo de maior impacto em relação ao ano considerado. Dessa forma, o Quadro 5.1 apresenta este resultado, que pode ser útil para os tomadores de decisão observarem o processo de maior impacto, visando sua redução no ano em questão, como será discutido posteriormente.

Quadro 5.1 – Processos mais impactantes por ano (*midpoints*)

Ano	1	2	3	4	5	6-54	55-60
Processo	Desvio do rio	Barragem e dique	Barragem e dique	Casa de força	Geradores	Óleo lubrificante ²⁴	Transporte ²⁵

Com base nos mapas das Figuras 5.6 – 5.8 e os demais apresentados no Apêndice A3, que mostram os principais locais impactados por área de proteção por ano (*endpoints*), é possível evidenciar que a cadeia de produção dos insumos (fluxos elementares) também apresenta certa influência fora do Brasil, uma vez que em alguns de seus recursos são encontrados fora do país ou porque foi aplicada a localização global, citada anteriormente. Fica evidente que, no geral, o principal local impacto é o Brasil, com alguns mapas dispondo de informações regionais, apresentando os impactos diretamente na região Centro-Oeste do país (vide Apêndice A3).

²⁴ Etapa de O&M, na qual foi considerada a aplicação de óleo lubrificante ao longo dos anos nos processos turbinas, geradores, comportas e equipamentos elétricos.

²⁵ Disposição em aterro.

Observou-se também que, após o Brasil, a China foi bastante impactada no ano 1 para a área de proteção ‘Ecossistema’, como pode ser observado no mapa da Figura 5.6 e na Tabela 5.16, que apresenta os locais de maior impacto e os fluxos elementares da cadeia de suprimentos que o ocasiona. É possível observar que o Brasil é o mais impactado, principalmente por conta da produção de clínquer, utilizado na fabricação do cimento, e da utilização de areia. Porém a China de apresenta em segundo lugar, por conta da alta produção de coque de petróleo.

A fim de investigar a razão do considerável impacto na China, observou-se a cadeia de produção dos insumos e conclui-se que a produção do cimento, apesar de estar considerando sua realização no Brasil, tem forte influência do coque de petróleo proveniente da China, segundo base de dados ecoinvent v3.10. O coque de petróleo é um combustível fóssil sólido utilizado nas indústrias de base para produção de uma série de materiais que resultarão em produtos do nosso dia a dia. Ele possui altos teores de carbono e é bastante poluente.

Tabela 5.16 – Locais de maior impacto para a área de proteção ‘Ecossistema’ no ano 1.

Local	Qtd.	Unidade
Brasil (BR)	0,04142	espécies.ano
Produção de clínquer, consequencial	0,02487	espécies.ano
areia, extração do leito do rio, consequencial	0,0091	espécies.ano
produção de argila calcinada, consequencial	0,00346	espécies.ano
transporte de caminhão de carga	0,00277	espécies.ano
China (CN)	0,04001	espécies.ano
produção de coque, têmpera úmida, consequencial	0,03243	espécies.ano
operação e preparação de mina de carvão, consequencial	0,00475	espécies.ano
eletricidade, produção a carvão, consequencial	0,00129	espécies.ano
produção de coque, têmpera seca, consequencial	0,00066	espécies.ano
Resto do Mundo (RoW)	0,03828	espécies.ano
Global (GLO)	0,01377	espécies.ano
Brasil (Centro-Oeste e Sudoeste)	0,00967	espécies.ano
produção de eletricidade, hidrelétrica com reservatório, consequencial	0,00965	espécies.ano

Fonte: Resultados gerados pelo *software* openLCA com emprego do método ReCiPe2016.

Para concluir sobre a real influência na China (CN), alterou-se a produção do coque de petróleo na cadeia de suprimentos de cimento no ano 1 para a produção considerando a localização ‘Resto do Mundo’ (RoW), uma extrapolação da localização GLO apresentada anteriormente.

Como a cadeia de produção é extensa, a Figura 5.10 apresenta parte dela, a fim de exemplificar como estas informações são geradas pelo *software* openLCA e expressar em que parte da cadeia a alteração foi realizada. Já a Tabela 5.17 faz

um paralelo com a Tabela 5.16. Ela mostra os locais de maior impacto e os fluxos elementares da cadeia de suprimentos que o ocasiona após tal alteração. É possível perceber que, diferentemente da Tabela 5.16, na Tabela 5.17, o Brasil não é o principal local impactado, dando lugar para a localização definida como ‘Resto do Mundo’ (RoW), apresentada anteriormente. Neste caso, a produção de concreto, na qual se insere o coque de petróleo, foi alterada para esta localidade.

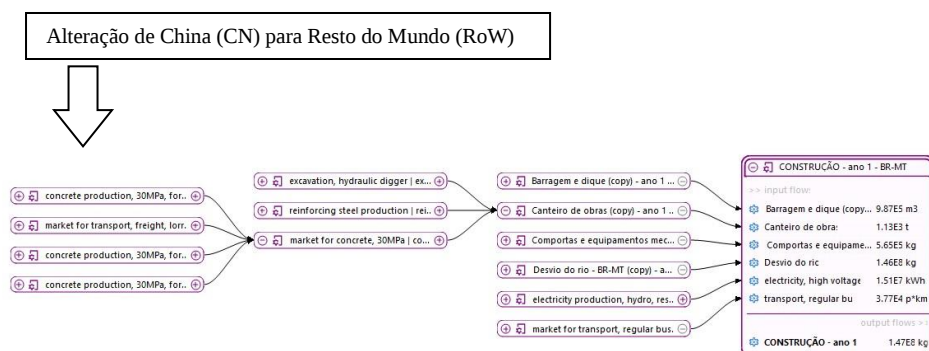


Figura 5.10 – Cadeia de suprimentos do concreto (parcial)

Fonte: Resultados gerados pelo software openLCA.

Tabela 5.17 – Locais de maior impacto para a área de proteção ‘Ecosistema’ no ano 1 alterando-se CN para RoW

Local	Quantidade	Unidade
Resto do Mundo (RoW)	0,06022	espécies.ano
produção de coque, consequencial	0,03655	espécies.ano
produção de ferro gusa, consequencial	0,00417	espécies.ano
detonação (de construção ou mineração), consequencial	0,00414	espécies.ano
excavação, escavadeira hidráulica, consequencial	0,0023	espécies.ano
produção de sinter de ferro, consequencial	0,00164	espécies.ano
construção de rodovias, consequencial	0,00121	espécies.ano
Brasil (BR)	0,04142	espécies.ano
produção de clínquer, consequencial	0,02487	espécies.ano
areia, extração do leito do rio, consequencial	0,0091	espécies.ano
produção de argila calcinada, consequencial	0,00346	espécies.ano
transporte de caminhão de carga	0,00277	espécies.ano
China (CN)	0,01631	espécies.ano
produção de coque, temperatura úmida, consequencial	0,01085	espécies.ano
operação e preparação de mina de carvão, consequencial	0,00349	espécies.ano
eletricidade, produção a carvão, consequencial	0,00095	espécies.ano
produção de coque, temperatura seca, consequencial	0,00022	espécies.ano
fundição de cobre, consequencial	0,00017	espécies.ano
Global (GLO)	0,01481	espécies.ano
Brasil (Centro-Oeste e Sudoeste)	0,00967	espécies.ano
produção de eletricidade, hidrelétrica com reservatório, consequencial	0,00965	espécies.ano
Europa (RER)	0,00175	espécies.ano

Fonte: Resultados gerados pelo software openLCA.

A Figura 5.11 apresenta o mapa de localização dos impactos para área de proteção ‘Ecosistema’ no ano 1 após alteração de CN para RoW na produção do coque de petróleo.

Uma outra forma de apresentação dos resultados disponibilizada pelo *software* openLCA e que possibilita a visualização de toda a cadeia de suprimentos é o Diagrama de Sankey, diagrama de fluxo cuja largura das setas é proporcional à taxa de fluxo. Por ser extenso, é apresentado um exemplo dele no Apêndice A4. Nele, é possível visualizar toda a cadeia de suprimentos, inclusive o coque de petróleo citado anteriormente.



Figura 5.11 – Locais impactados para a área de proteção “Ecosistema” no ano 1 (produção do coque de petróleo alterado de CN para RoW)²⁶
Fonte: Resultados gerados com emprego do método ReCiPe2016.

5.5 Discussão dos resultados

Destacam-se as contribuições metodológicas significativas que emergiram da aplicação do modelo conceitual de avaliação de ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica com uma abordagem espaço-temporal.

Uma das principais contribuições metodológicas deste estudo é a integração bem-sucedida de parâmetros espaciais e temporais em um novo *framework* de ACV para sistemas de geração de energia hidrelétrica no Brasil. Enquanto a maioria dos estudos anteriores adotou uma abordagem atribucional de ACV, este estudo avançou ao incorporar uma perspectiva espaço-temporal,

²⁶ Comparável ao mapa da Figura 5.6.

reconhecendo a importância de considerar parâmetros espaciais e temporais ao longo do ciclo de vida desses sistemas.

Além disso, a aplicação de um modelo de ACV espaço-temporal para a usina hidrelétrica Sinop proporcionou importantes subsídios para futuras tomadas de decisão relacionadas a novos empreendimentos de geração de energia hidrelétrica. A capacidade de avaliar os impactos ambientais nos pontos intermediários (*midpoints*) e finais (*endpoints*) segundo uma abordagem mais abrangente e precisa na definição de metas para minimizar danos durante a implantação e operação desses empreendimentos.

Quanto aos resultados obtidos a partir da aplicação das duas metodologias de ACV - convencional e espaço-temporal -, e sua comparação, observou-se que a ACV espaço-temporal é mais conservadora, de modo que os resultados dos impactos ambientais, tanto na abordagem *midpoint* quanto na *endpoint*, se apresentam, em geral, com duas ordens de grandeza maiores do que a convencional. No caso da comparação entre a ACV convencional e a média da ACV espaço-temporal, este valor se reduz para uma ordem de grandeza em boa parte das categorias de impacto, porém se mantém mais conservador para o caso espaço-temporal.

Ao comparar com os estudos prévios de ACV de geração de energia hidrelétrica desenvolvidos em diversos países (Turconi et al., 2014; Messagie et al., 2014; Vuarnoz e Jusselme, 2018; Cusenza et al., 2020; Pereira e Posen, 2020; Schomberg et al., 2022), observa-se que a inclusão conjunta de considerações espaciais e temporais na avaliação do ciclo de vida desses sistemas ainda é uma área emergente e este estudo buscou contribuir significativamente ao propor e aplicar um modelo de ACV espaço-temporal, preenchendo uma lacuna importante na pesquisa nesse campo.

Considerando os estudos de ACV para fontes hidrelétricas realizados no contexto brasileiro (Ribeiro e da Silva, 2010; Barros et al., 2018), o presente trabalho amplia as categorias de impacto analisadas, uma vez que Barros et al. (2018) se limitou às categorias Mudanças Climáticas e Potencial de Mudança de Temperatura Global e se propôs a realizar uma avaliação da matriz elétrica brasileira a partir de inventários prontos na base de dados ecoinvent v3.3, fazendo uso do processo *electricity production, hydro, reservoir, tropical region* para o caso da hidrelétrica. Por outro lado, Ribeiro e da Silva (2010) se propuseram a

realizar um inventário de ciclo de vida representativo para as condições brasileiras e apontou como os pontos críticos da construção da usina a utilização de concreto e de aço, achados alinhados com os do presente trabalho. Porém, Ribeiro e da Silva (2010), além de se limitarem ao ICV, consideraram menos processos e fluxos elementares, bem como não trataram o descomissionamento da usina. Vale destacar que nenhum dos estudos citados realizou a inclusão de parâmetros espaciais e temporais nas análises.

Já considerando estudos fora do contexto brasileiro, Schomberg et al. (2022) trata de diferentes fontes de geração de energia elétrica em diferentes países. Para sistemas hidrelétricos, os autores tratam de uma usina hidrelétrica a fio d'água na região da Alemanha. Este estudo apresenta uma importante contribuição ao observar os locais de maior impacto para cada fonte considerada (energia solar concentrada, energia hidrelétrica a fio d'água e biomassa), inserindo questões espaciais. Porém, o estudo não apresenta questões temporais nas análises.

Se limitando à categoria de impacto mudanças climáticas, Kumar et al. (2019) investigaram a influência de 12 reservatórios na China ao longo de 100 anos. O estudo apresenta questões espaciais e temporais na análise, porém não apresentar os locais impactados e não propõe um modelo claro para replicação. Também se limitando às mudanças climáticas, Olkkonen e Syri (2016) tem como principal intuito avaliar o sistema de energia elétrica de países nórdicos e da União Europeia, identificando sua operação na margem de acordo com a variação de tempo e região. O estudo não realiza uma ACV clara para uma fonte de geração específica, tratando da matriz elétrica no geral.

Há dois estudos (Atilgan e Azapagic, 2016; Akber et al., 2017) que consideram impactos sociais e econômicos em conjunto com impactos ambientais e buscam inserir parâmetros espaciais e temporais na análise. Porém, em ambos, a questão temporal se mostra limitada aos impactos econômicos, não se estendendo para os impactos ambientais analisados.

Ao empregar uma abordagem consequencial em contraste com os estudos de ACV que adotaram a abordagem atribucional, este estudo pode trazer diversos benefícios significativos:

- Consideração de impactos indiretos: A abordagem consequencial permite a avaliação de impactos indiretos ao longo de toda a cadeia

de suprimentos e ciclo de vida do sistema de geração de energia hidrelétrica. Isso inclui impactos que podem surgir de mudanças no mercado, demanda por recursos, efeitos em cascata, entre outros, que podem não ser capturados pela abordagem atribucional;

- **Análise de cenários alternativos:** Com a abordagem consequencial, é possível analisar cenários alternativos e avaliar as consequências de diferentes decisões e ações. Isso permite uma visão mais abrangente e prospectiva dos impactos ambientais, sociais e econômicos associados à geração de energia hidrelétrica;
- **Maior transparência e credibilidade:** A abordagem consequencial pode aumentar a transparência e a credibilidade dos estudos de ACV, uma vez que considera as consequências reais das ações tomadas em vez de apenas atribuir impactos a um determinado produto ou processo;
- **Avaliação de *trade-offs* e sinergias:** Ao adotar uma abordagem consequencial, é possível avaliar *trade-offs* e sinergias entre diferentes impactos ao longo do ciclo de vida do sistema de geração de energia hidrelétrica. Isso ajuda a identificar oportunidades de melhoria e otimização, bem como a minimização de impactos negativos.

Para concluir, pode-se afirmar que a abordagem inovadora adotada neste estudo não apenas amplia o conhecimento sobre ACV de sistemas de geração de energia hidrelétrica no Brasil, mas também fornece uma base metodológica para futuras pesquisas e desenvolvimentos nessa área, destacando a importância da integração de parâmetros espaciais e temporais para uma avaliação mais abrangente dos impactos ambientais. O desenvolvimento do estudo-empírico torna claro que a inserção de parâmetros espaciais e temporais na avaliação de ciclo de vida permite uma ampla gama de discussões, não possível anteriormente para o modelo convencional. Por outro lado, a necessidade de informações confiáveis ainda se mostra um limitante, em especial na etapa de ICV. A inserção de variação espaço-temporal nos estudos tende a aumentar o número de informações necessárias, de forma que esforços ainda precisam ser dispensados nesta etapa.

6 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo investigar a aplicação de uma avaliação do ciclo de vida (ACV) espaço-temporal para sistemas de geração de energia hidrelétrica, buscando oferecer novas perspectivas e contribuir significativamente para o avanço do conhecimento nesta área. As principais conclusões deste estudo são discutidas em relação às questões de pesquisa delineadas inicialmente.

A inclusão de uma perspectiva espaço-temporal na ACV para sistemas de geração de energia hidrelétrica permitiu uma compreensão mais abrangente e precisa dos impactos ambientais ao longo do tempo e espaço. Tradicionalmente, a ACV tem se concentrado em uma análise estática que não considera variações temporais e espaciais significativas que podem afetar os resultados. A abordagem espaço-temporal vem preencher essa lacuna, proporcionando uma avaliação dinâmica que reflete melhor as complexidades do mundo real.

Este avanço metodológico contribui para o conhecimento no campo da ACV de várias maneiras:

- **Realismo nos resultados:** A abordagem espaço-temporal permite a inclusão de variáveis dinâmicas que influenciam os impactos ambientais, como mudanças no uso do solo, variações climáticas sazonais e alterações na qualidade da água ao longo do tempo. Isso resulta em uma representação mais precisa e realista dos impactos ambientais;
- **Antecipação de cenários futuros:** A modelagem espaço-temporal facilita a previsão de cenários futuros, permitindo a análise de como diferentes políticas, práticas de gestão e mudanças climáticas podem afetar os impactos ambientais dos sistemas hidrelétricos. Isso é crucial para o planejamento estratégico das empresas do setor elétrico e a formulação de políticas públicas sustentáveis no longo prazo;
- **Identificação de áreas críticas:** A análise espaço-temporal ajuda a identificar áreas geográficas e períodos críticos onde os impactos

ambientais são mais severos. Isso orienta ações mitigadoras e medidas de conservação mais eficazes e direcionadas;

- Consideração de variabilidades regionais: O modelo proposto permite considerar as especificidades geográficas e temporais de diferentes regiões, levando em conta variações climáticas, características dos ecossistemas locais e dinâmicas socioeconômicas regionais. Isso resulta em uma avaliação mais representativa e contextualizada dos impactos ambiental;
- Melhoria na qualidade dos dados: A necessidade de dados espacialmente e temporalmente explícitos incentiva a coleta e o uso de informações mais detalhadas e específicas, contribuindo para o aprimoramento das bases de dados de ACV no contexto estudado;
- Impactos ambientais dos sistemas hidrelétricos sob uma perspectiva consequential.

A modelagem de ACV consequential aplicada neste estudo revelou uma série de impactos ambientais associados aos sistemas de geração de energia hidrelétrica. Estes impactos foram calculados e proporcionaram novas informações sobre as implicações ambientais das operações hidrelétricas, a saber:

- Variabilidade temporal: A modelagem consequential permitiu observar como os impactos ambientais se modificam ao longo do tempo, revelando, por exemplo, que as emissões de gases de efeito estufa são mais intensas nas fases iniciais de construção e nos primeiros anos de operação, tendendo a diminuir ao longo da vida útil da usina;
- Impactos locais e globais: A análise espaço-temporal evidenciou a importância de considerar tanto os impactos locais (como alterações na biodiversidade e no uso da terra) quanto os impactos globais (como as mudanças climáticas) associados à geração hidrelétrica. Isso ressalta a necessidade de uma abordagem holística na avaliação e gestão ambiental desses sistemas;
- *Trade-offs* ambientais: O estudo revelou importantes *trade-offs* entre diferentes categorias de impacto ambiental. Por exemplo, enquanto a geração hidrelétrica pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa em comparação com fontes fósseis, ela pode ter

impactos significativos em termos das alterações na biodiversidade local;

- Influência de cenários futuros: A abordagem consequential possibilita a análise de diferentes cenários futuros, considerando variações na matriz energética, mudanças tecnológicas e alterações nas condições climáticas. Isso permite antecipar possíveis estados futuros do sistema e seus impactos associados, fornecendo informações valiosas para o planejamento de longo prazo.

Estas conclusões demonstram que a avaliação do ciclo de vida espaço-temporal representa um avanço significativo na compreensão e quantificação dos impactos ambientais associados aos sistemas de geração de energia hidrelétrica. Ao fornecer uma visão mais detalhada, dinâmica e contextualizada desses impactos, esta abordagem contribui para:

- Aprimorar o processo de tomada de decisão no planejamento e gestão de empreendimentos hidrelétricos;
- Desenvolver estratégias mais eficazes de mitigação e compensação de impactos ambientais;
- Promover uma compreensão mais abrangente e equilibrada dos benefícios e desafios associados à energia hidrelétrica no contexto da transição para uma matriz energética de baixo carbono;
- Subsidiar a formulação de políticas públicas mais informadas e sustentáveis no setor energético.

Este estudo destaca a importância de se incorporar dimensões espaço-temporais na avaliação do ciclo de vida de sistemas de geração de energia hidrelétrica. As contribuições metodológicas sobre impactos ambientais obtidos através desta abordagem podem orientar políticas públicas mais informadas e práticas de gestão sustentável pelas empresas do setor elétrico. À medida que as mudanças climáticas e outras pressões ambientais continuam a crescer, é crucial que os métodos de avaliação ambiental evoluam para capturar a complexidade dinâmica dos sistemas naturais e das atividades humanas.

Com base nas conclusões deste estudo, várias recomendações para pesquisas futuras podem ser feitas para continuar avançando o conhecimento e a prática da ACV em sistemas de geração de energia hidrelétrica:

- Integração de dados climáticos e hidrológicos de alta resolução: Estudos futuros devem integrar dados climáticos e hidrológicos de alta resolução para melhorar a precisão das modelagens espaço-temporais. Isso permitirá uma avaliação mais detalhada das interações entre as mudanças climáticas e os impactos ambientais dos sistemas hidrelétricos;
- Consideração de diversos cenários de gestão: Estudos futuros devem explorar uma gama mais ampla de cenários de gestão dos sistemas hidrelétricos, incluindo práticas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Isso ajudará a identificar estratégias de gestão que minimizem os impactos ambientais adversos;
- Abordagens multicritério para a avaliação de impactos: A implementação de abordagens multicritério pode enriquecer a avaliação dos impactos ambientais, incorporando uma variedade de indicadores ambientais, sociais e econômicos. Isso fornecerá uma visão holística dos *trade-offs* e sinergias entre diferentes dimensões da sustentabilidade;
- Pesquisa participativa e co-criação de conhecimento: Envolver comunidades locais, partes interessadas e tomadores de decisão na pesquisa pode proporcionar insights valiosos e aumentar a relevância prática dos estudos. A co-criação de conhecimento pode ajudar a desenvolver soluções que sejam ambientalmente sustentáveis e socialmente aceitáveis;
- Expansão da aplicação de modelos espaço-temporais: Embora este estudo tenha se concentrado em sistemas hidrelétricos, a aplicação de modelos espaço-temporais pode ser expandida para outras formas de geração e armazenamento de energia, bem como setores industriais. Estudos futuros poderiam explorar a eficácia dessa abordagem em contextos variados para validar sua aplicabilidade e benefícios;
- Desenvolvimento de ferramentas de *software* avançadas: O desenvolvimento de ferramentas de *software* avançadas que facilitem a modelagem espaço-temporal pode democratizar o uso dessa abordagem, tornando-a acessível a um público mais amplo de pesquisadores e profissionais.

Em conclusão, esta pesquisa demonstra o potencial da avaliação do ciclo de vida espaço-temporal como uma ferramenta robusta para avançar o conhecimento e melhorar a gestão ambiental de sistemas de geração de energia hidrelétrica.

À medida que as mudanças climáticas e outras pressões ambientais continuam a crescer, é crucial que os métodos de avaliação ambiental evoluam para capturar a complexidade dinâmica dos sistemas naturais e das atividades humanas. Ao fornecer uma compreensão mais profunda e nuançada dos impactos ambientais desses sistemas, novas abordagens como a proposta nesta dissertação poderão contribuir significativamente para o desenvolvimento sustentável do setor energético e para os esforços globais de mitigação das mudanças climáticas.

Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL, 2020. **Resolução Normativa N° 875, de 10 de março de 2020**. Brasil, 2020.

AKBER, M.Z.; THAHEEM, M.J.; ARSHAD, H. Life cycle sustainability assessment of electricity generation in Pakistan: policy regime for a sustainable energy mix. **Energy Policy**, v.111, p.111–126, 2017.

ALTING, L.; HAUSCHILD, M.; WENZEL, H. Environmental assessment in product development. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series. **Mathematical Physical and Engineering Sciences**, v.355, n. 1728, p.1373-1386, 1997.

ASDRUBALI, F.; BALDINELLI, G.; D’ALESSANDRO, F.; SCRUCICA, F. Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: review and results harmonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p.1113– 1122, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma ABNT NBR ISO 14040: 2009. Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma ABNT NBR ISO 14044: 2009. Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ATILGAN B, AZAPAGIC A. Renewable electricity in Turkey: life cycle environmental impacts. **Renewable Energy**, vol. 89, p. 649-657, 2016.

AZEVEDO, L.B.; HENDERSON, A.D.; VAN ZELM, R.; JOLLIET, O.; HUIJBREGTS, M.A.J. Assessing the importance of spatial variability versus model choices in life cycle impact assessment: the case of freshwater eutrophication in Europe. **Environmental Science & Technology**, v. 47, p. 3565–13570, 2013a.

AZEVEDO, L.B.; HENDERSON, A.D.; VAN ZELM, R.; JOLLIET, O.; HUIJBREGTS, M.A.J. Assessing the importance of spatial variability versus model choices in life cycle impact assessment: the case of freshwater eutrophication in Europe. **Environmental Science & Technology**, v. 47, p. 3565–13570, 2013b.

AZEVEDO, L.B.; VAN ZELM, R.; ELSHOUT, P.M.F. et al. (2013c) Species richness-phosphorus relationships for lakes and streams worldwide. **Global Ecology and Biogeography**, v. 22, p. 1304–1314, 2013b.

AZEVEDO, L.B.; VAN ZELM, R.; ELSHOUT, P.M.F. et al. Species richness-phosphorus relationships for lakes and streams worldwide. **Global Ecology and Biogeography**, v. 22, p.1304–1314, 2013c.

AZEVEDO, L.B.; VAN ZELM, R.; HENDRIKS, A.J.; BOBBINK, R.; HUIJBREGTS, M.A. Global assessment of the effects of terrestrial acidification on plant species richness. **Environmental Pollution**, v. 174, p. 10-15, 2013d.

BARE, J. TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 13, p.:687–696, 2011.

BARE, J.; PENNINGTON, D.; HAES, H. Life cycle impact assessment sophistication. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.4, n.5, p. 299-306, 1999.

BARROS, M.V.; PIEKARSKI, C.M.; FRANCISCO, A. C. Carbon footprint of electricity generation in Brazil: an analysis of the 2016–2026 period. **Energies**, v. 11, n.6, article ID 1412, 2018.

BARROS, M.V.; SALVADOR, R.; MORO, C.; PIEKARSKI, C.M.; FRANCISCO, A. C.; SEIXAS, F.M.C. Life cycle assessment of electricity generation: a review of the characteristics of existing literature. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.25, p. 36–54, 2020.

BELOIN-SAINT-PIERRE, D. **Vers une caractérisation spatiotemporelle pour l'analyse du cycle de vie**. Paris, 2012, 208 p. Doctorat (Thèse). École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012.

BELOIN-SAINT-PIERRE, D.; ALBERS, A.; HÉLIAS, A. et al. Addressing temporal considerations in life cycle assessment. **Science of the Total Environment**, v. 743, article ID 140700, 2020.

BELOIN-SAINT-PIERRE, D.; HEIJUNGS, R.; BLANC, I. The ESPA (Enhanced Structural Path Analysis) method: A solution to an implementation challenge for dynamic life cycle assessment studies. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.19, n.4, p. 861–871, 2014.

BOUCHER, O. Comparison of physically- and economically based CO₂-equivalences for methane. **Earth System Dynamics**, v. 3, n.1, p. 49-61, 2012.

BRANDER, M.; TIPPER, R.; HUTCHISON, C.; DAVIS, G. **Consequential and attributional ap-proaches to LCA: A guide to policy makers with specific reference to greenhouse gas LCA of biofuels**. Hoboken, New Jersey: Ecometrica Press, 2009.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Energia. Janeiro de 2024**. Brasília: MME, edição de maio de 2024.

BRIONES HIDROVO, A.; UCHE, J.; MARTÍNEZ-GRACIA, A. Accounting for GHG net reservoir emissions of hydropower in Ecuador. **Renew Energy**, v.112, p.209–221, 2017.

BULLE, C.; MARGNI, M.; PATOUILLARD, L. et al. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.24, n.9, p.1653–1674, 2019.

CARDELLINI, G.; C. MUTEL, C. Temporalis: An open source software for dynamic LCA. **Journal of Open-Source Software**, v. 3, n.24, article ID, 2018.

CIROTH, A.; DI NOI, C.; LOHSE, T.; SROCKA, M. **open LCA 1.9. Comprehensive User Manual**. Berlin: GreenDeltaTC, 2019.

COLLET, P.; LARDON, L.; STEYER, J.-P.; HELIAS, A. How to take time into account in the inventory step: A selective introduction based on sensitivity analysis. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.19, n.2, p. 320–330, 2014.

COLLINGE, W.O.; LANDIS, A.E.; JONES, A.K.; SCHAEFER, L.A.; BILEC, L.M. Dynamic life cycle assessment: Framework and application to an institutional building. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.18, n.3, p. 538–552, 2013.

COMPANHIA ENERGÉTICA SINOP. **UHE Sinop: Projeto Básico Ambiental (PBA)**. Sinop, Mato Grosso: Companhia Energética Sinop, 2013.

CURRAN, M.; HELLWEG, S.; BECK, J. Is there any empirical support for biodiversity offset policy? **Ecological Applications**, v. 24, n. 4, p. 617–632, 2014.

CUSENZA, M.A.; GUARINO, F.; LONGO, S.; MISTRETTA, M.; CELLURA, M. Environmental assessment of 2030 electricity generation scenarios in Sicily: An integrated approach. **Renewable Energy**, v.160, p. 1148–1159, 2020.

DE BAAN, L.; ALKEMADE, R.; KOELLNER, T. Land use impacts on biodiversity in LCA: a global approach. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 6, p. 1216–1230, 2013.

DE SCHRYVER, A.M.; BRAKKEE, K.W., GOEDKOOP, M.; HUIJBREGTS, M.A.J. Characterization factors for global warming in life cycle assessment based on damages to humans and ecosystems. **Environmental Science & Technology**, v.43, p.1689–1695, 2009.

DE SCHRYVER, A.M.; VAN ZELM, R.; HUMBERT, S.; PFISTER, S.; MCKONE, T.E.; HUIJBREGTS, M.A.J. Value choices in life cycle impact assessment of stressors causing human health damage. **The Journal of Industrial Ecology**, v.15, p. 796–815, 2011.

DING, N.; LIU, J.; YANG, J.; YANG, D. Comparative life cycle assessment of regional electricity supplies in China. **Resources, Conservation & Recycling**, v.119, p.47–59, 2017.

DYCKHOFF, H.; KASAH, T. Time horizon and dominance in dynamic life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, v.18, p. 799–808, 2014.

EARLES, J. M.; HALOG, A. Consequential life cycle assessment: A review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 16, n.5, p. 445–453, 2011.

EC-JRC - JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION. **Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment** - background document. ILCD Handbook. Brussels: International Reference Life Cycle Data System, European Union, 2010.

ECOINVENT. Ecoinvent data base. Version 3.10. 2023. Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>. Acesso em: 15 mai. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE, 2023. **Página inicial**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt>>. Acesso em: 15 mai. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE. **Estudo de Viabilidade: UHE Sinop**. Brasília: EPE, 2010b.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE. **Relatório de Impacto Ambiental (RIMA): UHE Sinop**. Brasília, 2010a.

ERICSSON, N.; PORSO, C.; AHLGREN, S.; NORDBERG, Å.; SUNDBERG, C.; HANSSON, P.-A. Time-dependent climate impact of a bioenergy system: Methodology development and application to Swedish conditions. *GCB Bioenergy*, v.5, n.5, p. 580–590, 2013.

FEARNSIDE, P. M. Time preference in global warming calculations: A proposal for a unified index. *Ecological Economics*, v. 41, n.1, p.21-31, 2002.

FILLETI, R.A.; SILVA, D.A.; SILVA, E.J.; OMETTO, A.R. Dynamic system for life cycle inventory and impact assessment of manufacturing processes. *Procedia CIRP* 15, v.1, 531–536, 2014.

FINNVEDEN, G. On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v.5, p. 229–238, 2000.

FITZGERALD, D.; BOURGAULT G.; VADENBO, C. et al. **Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3.10 (2023.11.28)**. Zürich: ecoinvent Association, 2023.

FLURY, R.; FRISCHKNECHT, R. **Life cycle inventories of hydroelectric power generation imprint title life cycle inventories of hydroelectric power generation**. Uster, Switzerland: ESU-services Ltd., 2012.

FRANÇOIS, C.; GONDRAN, N.; NICOLAS, J. Spatial and territorial developments for life cycle assessment applied to urban mobility—case study on

Lyon area in France. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, p. 543–560, 2021.

FRISCHKNECHT, R.; BRAUNSCHWEIG, A.; HOFSTETTER, P.; SUTER, P. Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 20, n. 2, p. 159-189, 2000.

GELLER, M.T.B.; MENESES, A.A.D.M. Life cycle assessment of a small hydropower plant in the Brazilian Amazon. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v.4, n.4, p.379–391, 2016.

GOEL, V.; PRAKASH R.; BHAT, I. Life cycle energy and GHG analysis of hydroelectric power development in India. **International Journal of Green Energy**, v.7, n.4, p.361–375, 2010.

GUINEE, J.B. et al. Life cycle assessment: past, present, and futures. **Environmental Science & Technology**, v.45, n.1, p. 90-96, 2011.

GUINÉE, J.B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. **International Journal of Life Assessment**, v.7, p.311–313, 2002.

HANAFIAH, M.M.; XENOPOULOS, M.A.; PFISTER, S.; LEUVEN, R.S.; HUIJBREGTS, M.A.J. Characterization factors for water consumption and greenhouse gas emissions based on freshwater fish species extinction. **Environmental Science & Technology**, v. 45, p.5572–5278, 2011.

HAYASHI, K.; NAKAGAWA, A.; ITSUBO, N.; INABA, A. Expanded damage function of stratospheric ozone depletion to cover major endpoints regarding life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.11, p. 150–161, 2006.

HEIJUNGS, R; SUH, S. The Computational Structure of Life Cycle Assessment, ed. Arnold Tukker. **Eco-Efficiency in Industry and Science**, 11, 2002.

HELLWEG, S.; FRISCHKNECHT, R. **Evaluation of long-term impacts in LCA**. In: DFo, L.C.A.(Ed.), 22nd Discussion Forum on LCA. Discussion Forum on LCA. Zurich, p. 339–341, 2004.

HELLWEG, S.; HOFSTETTER, T.B.; HUNGERBUHLER, K. Discounting and the environment - should current impacts be weighted differently than impacts harming future generations? **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.8, p. 8–18, 2003.

HELLWEG, S.; MILÀ I CANALS, L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, v. 344, article ID 1109, 2014.

HELMES, R. J. K.; HUIJBREGTS, M.A. J.; HENDERSON, A.D.; JOLLIET, O. Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 5, p. 646-654, 2012.

HERRCHEN, M. Perspective of the systematic and extended use of temporal and spatial aspects in LCA of long-lived products. **Chemosphere**, v.37, n. 2, p. 265-270, 1998.

HILOIDHARI, M. et al. Emerging role of geographical information system (GIS), life cycle assessment (LCA) and spatial LCA (GIS-LCA) in sustainable bioenergy planning. **Bioresource Technology**, v.242, p.218-226, 2017.

HOEKSTRA, A. Y.; MEKONNEN, M. M. **The water footprint of humanity**. In: Proceedings of The National Academy of Sciences, [S.L.], v. 109, n. 9, p. 3232-3237, 2012.

HUIJBREGTS, M. A. J., et al. Framework for modelling data uncertainty in life cycle inventories. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 6, n.3, p.127-132, 2001.

HUIJBREGTS, M.A. J.; STEINMANN, Z.J.N.; ELSHOUT, P.M.F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; ZIJP, M.; HOLLANDER, A.; VAN ZELM, R. ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p.138-147, 2017.

HUIJBREGTS, M.A.J.; ROMBOUTS, L.J.A.; RAGAS, A.M.J.; VAN DE MEENT, D. Human-toxicological effect and damage factors of carcinogenic and noncarcinogenic chemicals for life cycle impact assessment. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 1, p.181–244, 2005.

IBICT. SICV Brasil. **Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida**. 2024. Disponível em: <https://sicv.acv.ibict.br/>. Acesso em: 15 mai. 2024.

IFU HAMBURG GMBH. **Umberto LCA+ (v10). User Manual**. Hamburg: ifu Hamburg GmbH, 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change - Summary for Policymakers. 2022. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>>. Acesso em: 15 mai. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC. **The Physical Science Basis**. In: Stocker, T.F., Qin, D.; Plattner, G.K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P.M. (Eds). Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, 2013.

JOLLIET, O.; SAADÉ-SBEITH, M.; SHAKED, S. et al. **Environmental life cycle assessment**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.

JONES, C.; GILBERT, P.; RAUGEI, M.; MANDER, S.; LECCISI, E. An approach to prospective consequential life cycle assessment and net energy analysis of distributed electricity generation. **Energy Policy**, v.100, p. 350–358, 2017.

JOORDAN, S.M.; COMBS, C. GUENTHER, E. Life cycle assessment of electricity generation: A systematic review of spatiotemporal methods. **Advances in Applied Energy**, v.3, article ID 100058, 2021.

JOOS, F.; ROTH, R.; FUGLESTVEDT, J. S.; PETERS, G. P.; ENTING, I. G.; VON BLOH, W.; BROVKIN, V.; BURKE, E. J.; EBY, M.; EDWARDS, N. R.. Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. **Atmospheric Chemistry And Physics**, v. 13, n. 5, p. 2793-2825, 2013.

JUNGBLUTH, N.; FRISCHKNECHT, R. Cumulative Energy Demand, In: HISCHIER, R.; WEIDEMA, B. (eds.). **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods**:ecoinvent report No. 3, v2.2. St Gallen: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010.

KABAYO, J.; MARQUES, P.; GARCIA, R.; FREIRE, F. Life-cycle sustainability assessment of key electricity generation systems in Portugal. **Energy**, vol.176, p. 131–142, 2019.

KADIYALA, A.; KOMMALAPATI, R.; HUQUE, Z. Evaluation of the life cycle greenhouse gas emissions from hydroelectricity generation systems. **Sustainability**, vol.8, n.6, article number 539, 2016.

KARLSSON, C.S.J.; MILIUTENKO, S.; BJÖRKLUND, A. et al. Life cycle assessment in road infrastructure planning using spatial geological data. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, p. 1302–1317, 2017.

KUMAR, A.; YANG, T.; SHARMA, M.P. Long-term prediction of greenhouse gas risk to the Chinese hydropower reservoirs. **Science of the Total Environment**, v. 646, p. 300-308, 2019.

LEBAILLY, F.; LEVASSEUR, A.; SAMSON, R.; DESCHÊNES, L. Development of a dynamic LCA approach for the freshwater ecotoxicity impact of metals and application to a case study regarding zinc fertilization. **Int J Life Cycle Assess**, 19, p.1745–1754, 2014.

LELEK, L.; KULCZYCKA, J.; LEWANDOWSKA, A.; ZAREBSKA, J. Life cycle assessment of energy generation in Poland. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.21, n.1, p. 1–14, 2016.

LEVASSEUR, A., LESAGE, P., MARGNI, M., DESCHENES, L., SAMSON, R. Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n.8, p. 3169–3174, 2010.

LEVASSEUR, A.; LESAGE, P.; MARGNI, M.; SAMSON, R. Biogenic carbon and temporary storage addressed with dynamic life cycle assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, , n.1, p. 117-128, 2013.

LIU, B.; WU, Q.; WANG, F. Regional optimization of new straw power plants with greenhouse gas emissions reduction goals: a comparison of different

logistics modes. **International Journal of Cleaner Production**, v.161, p.871–880, 2017.

LIU, K.F.-R.; HUNG, M.-J.; YEH, P.-C.; KUO, J.-Y. GIS-based regionalization of LCA. **Journal of Geoscience and Environmental Protection**, v.2, p.1–8, 2014.

LOISEAU, E. ; AISSANI, L. ; LE FÉON, S. et al. Territorial life cycle assessment (LCA): What exactly is it about? A proposal towards using a common terminology and a research agenda. **Journal of Cleaner Production**, 176:474–485, 2018.

LU, J.; TANG, J.; SHAN, R.; LI, G.; PINHUA, R.; ZHANG, N. Spatiotemporal analysis of the future carbon footprint of solar electricity in the United States by a dynamic life cycle assessment. **iScience**, v. 26, article ID 106188, 2023.

LUEDDECKENS, S.; SALING, P.; GUENTHER, E. Discounting and life cycle assessment: A distorting measure in assessments, a reasonable instrument for decisions. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v.19, n. 4, p.2961–2972, 2022.

LUEDDECKENS, S.; SALING, P.; GUENTHER, E. Temporal Issues in life cycle assessment: A systematic review. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.25, n.8, p. 1385–1401, 2020.

MAHMUD, M.A.P.; HUDA, N.; FARJANA, S.H.; LANG, C. A strategic impact assessment of hydropower plants in alpine and non-alpine areas of Europe. **Applied Energy**, v.50, p. 198-214, 2019.

MAIER, M. **Towards a spatio-temporal life cycle analysis: a novel approach to consider local and regional inventories**. Exeter, 2017, 201 p. Thesis (Doctor of Philosophy in Mathematics). University of Exeter, United Kingdom.

MAIER, M.; MUELLER, M.; YAN, X.Y. Introduction of a spatiotemporal life cycle inventory method using a wind energy example. **Energy Procedia**, v.142, p. 3035–3040, 2017.

MASANET, E.; CHANG, Y.; GOPAL, A.R.; LARSEN, P.; MORROW, W.R.; SATHRE, R.; , SHEHABI, A.; ZHAI, P. Life-cycle assessment of electric power systems. **Annual Review of Environmental Resources**, v.38, p.107–136, 2013.

MESSAGIE, M.; MERTENS, J.; OLIVEIRA, L.; RANGARAJU, S.; SANFELIX, J.; COOSEMANS, T.; MIERLO, J.V.; MACHARIS, C. The hourly life cycle carbon footprint of electricity generation in Belgium, bringing a temporal resolution in life cycle assessment. **Applied Energy**, v.134, p.:469–476, 2014.

MUNIZ, V.C.F. **Análise da fundamentação da avaliação de ciclo de vida consequencial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Faculdade de São Paulo. São Paulo, p. 16. 2012.

MUTEL, C. L.; HELLWEG, S. Regionalized life cycle assessment: computational methodology and application to inventory databases. **Environmental Science & Technology**, v.43, n.15, p. 5797-803, 2009.

MUTEL, C. L.; PFISTER, S.; HELLWEG, S. GIS-based regionalized life cycle assessment: how big is small enough? Methodology and case study of electricity generation. **Environmental Science & Technology**, v.46, n.2, p. 1096-1103, 2011.

NATIONAL INSTITUTE FOR PUBLIC HEALTH AND THE ENVIRONMENT. RIVM. **ReCiPe 2016 v.1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. Report I: Characterization. 2017. Disponível em: <https://www.rivm.nl/documenten/recipe2016v11>. Acesso em: 15 mai. 2024.

NITSCHHELM L, AUBIN J, CORSON MS et al. Spatial differentiation in life cycle assessment - LCA applied to an agricultural territory: current practices and method development. **Journal of Cleaner Production**, 112:2472–2484, 2016.

OLKKONEN, V.; SYRI, S. Spatial and temporal variations of marginal electricity generation: The case of the Finnish, Nordic, and European energy systems up to 2030. **Journal of Cleaner Production**, v.126, p. 515–525, 2016.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. ONS, 2021. **Avaliação das Condições de Atendimento Eletroenergético do Sistema Interligado Nacional - Estudo Prospectivo Junho a Novembro de 2021**. Brasil, 2021.

OTHONIEL, B.; RUGANI, B.; HEIJUNGS, R.; BEYER, M.; MACHWITZ, M.; POST, P. An improved life cycle impact assessment principle for assessing the impact of land use on ecosystem services. **Science Total Environment**, v.693, p.432–439, 2019.

OWENS, J.W. Life-cycle assessment in relation to risk assessment: an evolving perspective. **Risk Analysis**, v.17, p.359–365, 1997a.

OWENS, J.W. Life-cycle assessment: constraints on moving from inventory to impact assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 1, p. 37–49, 1997b.

PANG, M.; ZHANG, L.; WANG, C.; LIU, G. Environmental life cycle assessment of a small hydropower plant in China. **International Journal of Life Cycle Assessment**, vol.20, p. 796–806, 2015.

PASCALE, A.; URMEE, T.; MOORE, A. Life cycle assessment of a community hydroelectric Power system in rural Thailand. **Renewable Energy**, v.36, p. 2799–2808, 2011.

PATOUILLARD, L.; COLLET, P.; LESAGE, P. et al. Prioritizing regionalization efforts in life cycle assessment through global sensitivity analysis: a sector meta-analysis based on ecoinvent v3. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 12, p. 2238–2254, 2019.

PENNINGTON, D. W. et al. Multimedia fate and human intake modeling: Spatial versus nonspatial insights for chemical emissions in Western Europe. **Environmental Science & Technology**, v.39, n.4, p. 1119-1128, 2005.

PENNINGTON, D. W. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. **Environment International**, v.30, n.5, p. 721-739, 2004.

PERCHENART, E.; ROQUESALANE, A. SimaPro: logiciel d'analyse de cycle de vie. **Techniques de l'Ingénieur**, v.1, p. 1-20, 2014.

PEREIRA, L.; POSEN, I.D. Lifecycle greenhouse gas emissions from electricity in the province of Ontario at different temporal resolutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, 122514, 2020.

PFISTER, S.; KOEHLER, A.; HELLWEG, S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. **Environmental Science & Technology**, v.43, p.4098–4104, 2009.

PIGNE, Y.; GUTIÉRREZ, T.N.; GIBON, T.; SCHAUBROECK, T.; POPOVICI, E.; SHIMAKO, A.H.; BENETTO, E.; TIRUTA-BARNA, L. A tool to operationalize dynamic lca, including time differentiation on the complete background database. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.25, n.2, p. 267-279, 2020.

PINSONNAULT, A.; LESAGE, P.; LEVASSEUR, A.; SAMSON, R. Temporal differentiation of background systems in LCA: relevance of adding temporal information in LCI databases. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n.11, p. 1843–1853, 2014.

POTTING, J. et al. Site-dependent life-cycle impact assessment of acidification. **Journal of Industrial Ecology**, v.2, n.2, p.63-87, 1998.

POTTING, J.; BLOK, K. Life-cycle assessment of four types of floor covering. **Journal of Cleaner Production**, v.3, n.4, p. 201-213, 1995.

POTTING, J.; HAUSCHILD, M.Z. Part II: Spatial differentiation in life-cycle assessment via the site-dependent characterization of environmental impact from emissions. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 2, p.209–216, 1997.

POTTING, J.; HAUSCHILD, M.Z. Spatial differentiation in life cycle impact assessment: a decade of method development to increase the environmental realism of LCIA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.11, p. 11-13, 2006.

RAADAL, H.L.; GAGNON, L.; MODAHL, I.S.; HANSSEN, O.J. Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 15, p. 3417–3422, 2011.

RAHN, A.; WICKE, K.; WENDE, G. A comparison of temporally dynamic life cycle assessment methods for ecological evaluation in aviation. **Procedia CIRP** 116, v.1, p.149–154, 2023.

RAJAGOPAL, D. A step towards a general framework for consequential life cycle assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v.21, n.2, p. 1-11, 2016.

RAUGEI, M.; ULGIATI, S. A novel approach to the problem of geographic allocation of environmental impact in life cycle assessment and material flow analysis. **Ecological Indicators**, v. 9, n.6, p.1257-1264, 2009.

REAP, J., ROMAN, F., DUNCAN, S., BRAS, B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 1. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.13, p.290–300, 2008a.

REAP, J., ROMAN, F., DUNCAN, S., BRAS, B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 2. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.13, 374–388, 2008b.

RIBEIRO, F. M.; SILVA, G. A. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v.18, p. 44–54, 2010.

ROY, P.-O.; AZEVEDO, L.B.; MARGNI, M.; VAN ZELM, R.; DESCHÊNES, L.; HUIJBREGTS, M.A.J. Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: a systematic analysis of spatial variability and uncertainty. **Science of the Total Environment**, v. 500-501, p. 270-276, 2014.

ROY, P.O.; DESCHENES, L.; MARGNI, M. Life cycle impact assessment of terrestrial acidification: modeling spatially explicit soil sensitivity at the global scale. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n.15, p. 8270–8278, 2012a.

ROY, P.O.; HUIJBREGTS, M.; DESCHENES, L.; MARGNI, M. Spatially-differentiated atmospheric source-receptor relationships for nitrogen oxides, sulfur oxides and ammonia emissions at the global scale for life cycle impact assessment. **Atmospheric Environment**, v.62, p. 74–81, 2012b.

SACCHI, R.; BESSEAU, R.; PÉREZ-LÓPEZ, P.; BLANC, I. Exploring technologically, temporally and geographically sensitive life cycle inventories for wind turbines: A parameterized model for Denmark. **Renewable Energy**, v.132, p.1238-1250, 2019.

SAEZ DE BIKUÑA, K.; HAMELIN, L.; HAUSCHILD, M.Z.; PILEGAARD, K.; IBROM, A. 2018. A comparison of land use change accounting methods: seeking common grounds for key modeling choices in biofuel assessments. **Journal of Cleaner Production**, v.177, p. 52–61, 2018.

SAN MIGUEL, G.; CERRATO, M. Life cycle sustainability assessment of the Spanish electricity: Past, present and future projections. **Energies**, v.13, article 1896, 2020.

SANTOYO-CASTELAZO, E.; GUJBA, H.; AZAPAGIC, A. Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. **Energy**, v. 36, n.3, p.1488–1499, 2011.

SCACHETTI, M.T. **Avaliação consequencial do ciclo de vida: discussão e aplicação comparativa com a abordagem atribucional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia da Universidade de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2016.

SCHOMBERG, A.C., BRINGEZU, S., FLÖRKE, M. et al. Spatially explicit life cycle assessments reveal hotspots of environmental impacts from renewable electricity generation. **Communications Earth & Environment**, v. 3, p.197, 2022.

SHAH, V.; RIES, R. A characterisation model with spatial and temporal resolution for life cycle impact assessment of photochemical precursors in the United States. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.14, p.313–327, 2009.

SHARMA, R.; GUPTA, K. Life cycle modeling for environmental management: a review of trends and linkages. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.192, n.1, p. 51, 2019.

SHIMAKO, A.H.; TIRUTA-BARNA, L.; FARIA, A.B.B.; AHMADI, A. SPÉRANDIO, M. Sensitivity analysis of temporal parameters in a dynamic LCA framework. **Science of the Total Environment**, v.624, n.4, p. 1250-1262, 2018.

SHUKLA, P.R. et al. **Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Paris, France: UNEP, 2022.

SIDDIQUI, O.; DINCER, I. Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: a life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v.164, p.848–860, 2017.

SIMAPRO, **SimaPro Database Manual-Methods**. 2020. Disponível em: <https://simapro.com/wp873content/uploads/2020/06/DatabaseManualMethods.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2024.

SINOP ENERGIA. Usina Hidrelétrica Sinop, 2024. **Página inicial**. Disponível em: <<https://www.sinopenergia.com.br/>>. Acesso em: 15 mai. 2024.

SOHN, J.; KALBAR, P.; GOLDSTEIN, B.; BIRKVED, M. Defining temporally dynamic life cycle assessment: A review. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v.16, n.3, p. 314-232, 2020.

SOLTOVSKI, A. Modelo de gestão para lubrificação e dos lubrificantes aplicados em turbinas hidráulicas: aplicação na usina hidrelétrica de Itaipu. 2017. 108 f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gerência de Manutenção)** - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SONNEMANN, G. et al. **Global guidance principles for life cycle assessment database - Shonan guidance principles**. In: Evers, D.; Kapustka, L. (eds.). SCP documents. Geneva: UNEP - SETAC, 2011.

SOUZA, L.L.P. **Análise do ciclo de vida consequencial da maximização das fontes renováveis em cenários futuros da matriz elétrica no Brasil**. Itajubá, 2021, 192p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá.

SPHERA. **GaBi Software 10.6.1 & GaBi Content Version 2022.1: Update Guide and Important Instructions**. Sphera, 2022.

SU, S.; JU, J.; DING, Y.; YUAN, J.; CUI, P. A comprehensive dynamic life cycle assessment model: considering temporally and spatially dependent variations. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.19, article ID 14000, 2022.

SU, S.; LI, X.; ZHU, C.; LU, Y.; LEE, H.W. Dynamic life cycle assessment: A review of research for temporal variations in life cycle assessment studies. **Environmental Engineering Science**, v. 38, n.11, p. 1013–1026, 2021.

SUH, S.; YANG, Y. On the uncanny capabilities of consequential LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.19, p. 1179–1184, 2014.

TABATABAIE, S.M.H.; TAHAMI, H.; MURTHY, G.S. A regional life cycle assessment and economic analysis of camelina biodiesel production in the Pacific Northwestern US. **Journal of Cleaner Production**, v.172, p. 2389–2400, 2018.

TEFFERA, B.; ASSEFA, B.; ASSEFA, G.; Assessing the life cycle environmental impacts of hydroelectric generation in Ethiopia. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v.41, article ID 100795, 2020.

TURCONI, R.; TONINI, D.; NIELSEN, C.F.B.; SIMONSEN, C.G.; ASTRUP, T. Environmental impacts of future low-carbon electricity systems: Detailed life cycle assessment of a Danish case study. **Applied Energy**, v, 132, p.66–73, 2014.

UGAYA, C. M. L.; ALMEIDA NETO, J. A.; FIGUEIREDO, M. C. B. (Orgs.) **Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro**. Brasília: IBICT, 2019.

UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. UNECE. **Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources**. Geneva: UNECE, 2022.

UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. UNECE. **Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options**. Geneva: UNECE, 2021.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Background Report for a UNEP guide to life cycle management - A bridge to sustainable products**. Paris, 2006.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. National Energy Technology Laboratory. **Role of alternative energy sources: hydropower technology assessment**. DOE/NETL-2011/1519. Pittsburg, USA: DOE. NREL, 2012.

URBAN, M.C. Accelerating extinction risk from climate change. **Science**, v. 348, p.571–573, 2015.

VAN ZELM, R.; PREISS, P.; VAN GOETHEM, T.; VAN DINGENEN, R.; HUIJBREGTS, M. Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: damage to human health and vegetation. **Atmospheric Environment**, v. 134, p. 129-137, 2016.

VAN ZELM, Rosalie; HUIJBREGTS, Mark A. J.; MEENT, Dik van de. USES-LCA 2.0—a global nested multi-media fate, exposure, and effects model. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, n. 3, p. 282-284, 2009.

VIEIRA, M.D. M.; PONSIOEN, T.C.; GOEDKOOP, M.J.; HUIJBREGTS, M.A.J. Surplus ore potential as a scarcity indicator for resource extraction. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 2, p. 381-390, 2016a.

VIEIRA, M.D.M.; PONSIOEN, T.C.; GOEDKOOP, M.; HUIJBREGTS, M.A.J. Surplus cost potential as a life cycle impact indicator for metal extraction. **Resources**, v. 5, p.1–12, 2016b.

VIEIRA, M.D.M.; PONSIOEN, T.C.; GOEDKOOP, M.; HUIJBREGTS, M.A.J. **Fossil resource scarcity**. In: HUIJBREGTS, M.A.J. et al. (eds). ReCiPe2016. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: characterization. RIVM Report 2016-0104. National Institute for Human Health and the Environment, Bilthoven. Chapter 13, 2016c.

VUARNOZ, D.; JUSSELME, T. Temporal variations in the primary energy use and greenhouse gas emissions of the electricity provided to the Swiss grid. **Energy**, v.161, p. 573–582, 2018.

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WERNET, G. **Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent Report v. 3, n.1, 2013.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO. **Scientific assessment of ozone depletion: 2010**, Global Ozone Research and Monitoring Project-report no.52. Switzerland: Geneva, 2011.

YU, B.; SUN, Y.; TIAN, X. Capturing time effect of pavement carbon footprint estimation in the life cycle. **Journal of Cleaner Production**, v.171, p.877–883, 2018.

YUAN, C.; DORNFELD, D.A. **Embedded temporal difference in life cycle assessment: Case study on VW Golf A4 car**. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 2009.

ZHAI, Q.; CROWLEY, B.; YUAN, C. **Temporal discounting for life cycle assessment: differences between environmental discounting and economic discounting.** In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 2011.

ZHU, X.; WANG, S.; WANG, L. Life cycle analysis of greenhouse gas emissions of China's power generation on spatial and temporal scale. **Energy Science Engineering**, v. 10, p.1083–1095, 2022.

APÊNDICE A1

Fluxos elementares – nomenclatura ecoinvent

Quadro A1.1 – Fluxos elementares no ecoinvent

Fluxo elementar	fluxo elementar no ecoinvent	Unidade	Processo
Construção			
Uso da motosserra	power sawing, with catalytic converter	h	Reservatório
Concreto	concrete, 30MPa	m ³	Canteiro de obras
Escavação comum	market for excavation, hydraulic digger	m ³	
Aço	market for reinforcing steel	kg	
Escavação comum (considerando areia úmida)	market for excavation, hydraulic digger	m ³	Casa de força
Escavação em rocha (TNT)	market for explosive, tovox	kg	
Concreto	market for concrete, 30MPa	m ³	
Aço	market for reinforcing steel	kg	
Escavação comum	market for excavation, hydraulic digger	m ³	Desvio do rio
Escavação em rocha (TNT)	market for explosive, tovox	kg	
Concreto	market for concrete, 30MPa	m ³	
Rocha	market for gravel, crushed	kg	
Solo/aterro (areia úmida)	sand quarry operation, open pit mine	kg	
Escavação comum	market for excavation, hydraulic digger	m ³	Barragem e dique
Escavação em rocha (TNT)	market for explosive, tovox	kg	
Concreto	market for concrete, 30MPa	m ³	
Aço	market for reinforcing steel	kg	
Rocha (brita)	market for gravel, crushed	kg	
Solo/aterro (areia úmida)	sand quarry operation, open pit mine	kg	
Escavação comum	market for excavation, hydraulic digger	m ³	Vertedouro
Escavação em rocha (TNT)	market for explosive, tovox	kg	
Concreto	market for concrete, 30MPa	m ³	
Aço	market for reinforcing steel	kg	
Aço	market for steel, unalloyed	kg	Comportas/grades e equipamentos mecânicos
	market for steel, unalloyed	kg	
	market for steel, unalloyed	kg	
Escavação comum	market for excavation, hydraulic digger	m ³	Circuito de adução/tomada d'água
Escavação em rocha (TNT)	market for explosive, tovox	kg	
Concreto	market for concrete, 30MPa	m ³	
Aço	market for reinforcing steel	kg	
Aço	steel production, electric, chromium steel 18/8	kg	Turbinas
Aço	steel production, electric, chromium steel 18/8	kg	Geradores
Cobre	wire drawing, copper	kg	
Cobre	wire drawing, copper	kg	Equipamentos elétricos

Fluxo elementar	fluxo elementar no ecoivent	Unidade	Processo
Transporte	transport, regular bus	person*km	Transporte de funcionários
	transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified	ton*km	Transporte de turbinas e geradores
Eletricidade	electricity production, hydro, reservoir, tropical region	kWh	Eletricidade
O&M			
Óleo lubrificante	market for lubricating oil	kg	Turbinas
Óleo lubrificante	market for lubricating oil	kg	Geradores
Óleo lubrificante	market for lubricating oil	kg	Comportas/grades e equipamentos mecânicos
Óleo lubrificante	market for lubricating oil	kg	Equipamentos elétricos
Eletricidade	electricity production, hydro, reservoir, tropical region	kWh	Eletricidade
Descomissionamento			
Transporte via caminhão para disposição em aterro (solo e rocha)	transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified	ton*km	Disposição em aterro (solo e rocha)
Transporte via caminhão para disposição em aterro (concreto)	transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified	ton*km	Disposição em aterro (concreto)
Transporte via caminhão para disposição em aterro (sucata metálica)	transport, freight, lorry, all sizes, EURO5 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified	ton*km	Disposição em aterro (sucata metálica)

APÊNDICE A2

Definição das categorias de impacto (*midpoint*)

Mudanças climáticas

A categoria de impacto das mudanças climáticas é avaliada usando o indicador de potencial de aquecimento global (GWP), que mede o aumento integrado do forçamento radiativo infravermelho dos gases de efeito estufa (GEEs) em termos de kg de CO₂-eq. Este indicador quantifica a contribuição de diferentes GEEs para as mudanças climáticas, fornecendo uma métrica padronizada para comparar seus efeitos de aquecimento.

Depleção de ozônio estratosférico

Esta categoria de impacto foca na depleção da camada de ozônio na estratosfera, causada principalmente por substâncias que degradam o ozônio (ODS). A avaliação considera o potencial de depleção de ozônio (ODP) das substâncias, refletindo sua capacidade de destruir moléculas de ozônio estratosférico e contribuir para o afinamento da camada de ozônio.

Radiação ionizante

A avaliação da radiação ionizante avalia os impactos potenciais da exposição à radiação na saúde humana e nos ecossistemas. Os fatores de caracterização consideram as propriedades radiológicas das substâncias e suas contribuições para as doses de radiação e os riscos à saúde associados.

Formação de material particulado

A avaliação da formação de material particulado foca na geração de partículas finas na atmosfera a partir de várias fontes de emissão. Os fatores de caracterização consideram as emissões de material particulado das substâncias e suas contribuições para a degradação da qualidade do ar e os efeitos na saúde humana.

Formação de ozônio

Esta categoria de impacto avalia a formação de ozônio à superfície através de reações fotoquímicas envolvendo emissões precursoras. Os fatores de

caracterização quantificam o potencial de formação de ozônio das substâncias e seus impactos na saúde respiratória.

Acidificação terrestre

A avaliação da acidificação avalia o potencial de acidificação das substâncias, levando a mudanças nos níveis de pH do solo e da água e impactos nos ecossistemas. Os fatores de caracterização consideram as propriedades acidificantes das substâncias e suas contribuições para a deposição ácida e acidificação dos ecossistemas.

Eutrofização de água doce

Esta categoria de impacto avalia a eutrofização dos ecossistemas de água doce causada por entradas de nutrientes, levando a um crescimento excessivo de algas e à depleção de oxigênio. Os fatores de caracterização consideram o conteúdo de nutrientes das substâncias e sua contribuição para o potencial de eutrofização em ambientes de água doce.

Toxicidade humana

A avaliação da toxicidade humana no nível intermediário avalia os impactos potenciais das substâncias na saúde humana por meio de várias vias de exposição. Os fatores de caracterização são derivados com base em pontos finais de toxicidade como carcinogenicidade, mutagenicidade e toxicidade sistêmica, fornecendo insights sobre os riscos potenciais apresentados por diferentes substâncias.

Ecotoxicidade terrestre

A avaliação da ecotoxicidade terrestre avalia o potencial de dano aos ecossistemas terrestres pela exposição a substâncias tóxicas. Os fatores de caracterização consideram a toxicidade das substâncias para organismos que vivem no solo, plantas e outras espécies terrestres, fornecendo insights sobre os riscos apresentados para a biodiversidade terrestre.

Ecotoxicidade aquática

Esta categoria de impacto foca nos potenciais efeitos tóxicos das substâncias nos ecossistemas de água doce. Os fatores de caracterização são desenvolvidos com

base na toxicidade das substâncias para organismos aquáticos, considerando fatores como níveis de toxicidade aguda e crônica e o potencial de bioacumulação nas cadeias alimentares aquáticas.

Ecotoxicidade marinha

A avaliação da ecotoxicidade marinha foca nos impactos potenciais das substâncias nos ecossistemas marinhos e organismos. Os fatores de caracterização são derivados com base na toxicidade das substâncias para espécies marinhas, considerando fatores como potencial de bioacumulação e sensibilidade dos organismos marinhos aos efeitos tóxicos.

Eutrofização marinha

A avaliação da eutrofização marinha foca no enriquecimento de nutrientes nos ecossistemas marinhos, levando a florações de algas, hipóxia e degradação do ecossistema. Os fatores de caracterização quantificam o potencial das substâncias de contribuir para a carga de nutrientes em ambientes marinhos e seus impactos na biodiversidade marinha.

Uso da terra

A avaliação do uso do solo avalia os impactos da transformação e ocupação do solo nos ecossistemas e na biodiversidade. Os fatores de caracterização consideram as mudanças no uso do solo associadas à produção de substâncias e suas contribuições para a perda, fragmentação e declínio da biodiversidade.

Consumo de água

A avaliação do uso da água foca no consumo e no potencial depleção de recursos de água doce por atividades humanas. Os fatores de caracterização quantificam o consumo de água das substâncias e suas contribuições para a escassez de água e os impactos nos ecossistemas aquáticos e no abastecimento de água humano.

Escassez de recursos minerais

A avaliação da depleção de recursos minerais foca na extração e depleção de recursos minerais não renováveis. Os fatores de caracterização quantificam o potencial de depleção de recursos das substâncias e suas contribuições para o esgotamento das reservas minerais.

Escassez de recursos fósseis

A avaliação da depleção de recursos fósseis avalia a extração e depleção de recursos de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural. Os fatores de caracterização consideram o conteúdo de combustíveis fósseis das substâncias e suas contribuições para a depleção de recursos fósseis e a escassez de energia.

Cabe ressaltar que ‘Formação de ozônio’ abrange duas categorias de impacto, i.e., nos ecossistemas terrestres e na saúde. Da mesma forma, ‘Toxicidade humana’ inclui a toxicidade carcinogênica e a não carcinogênica.

APÊNDICE A3

Mapas com a localização dos impactos nas áreas de proteção (*endpoints*) a partir do ano 2

Ano 2 (etapa de construção)

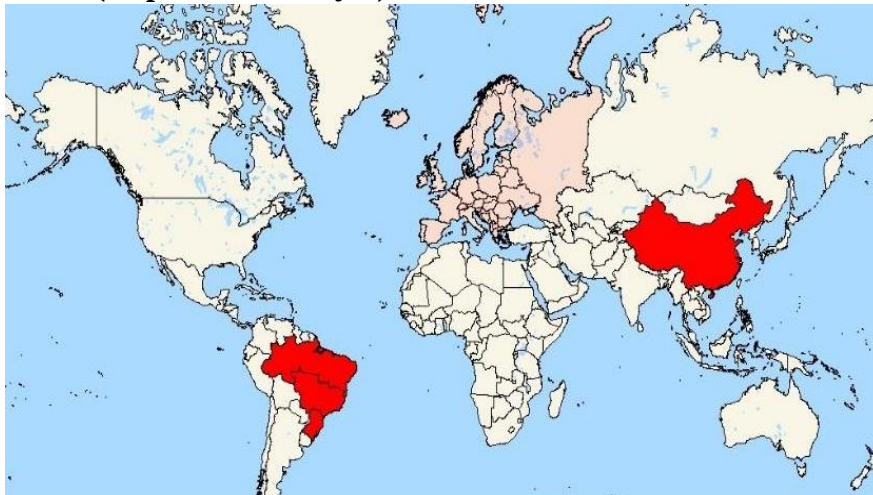


Figura A3.1 – Locais impactados para a área de proteção “Ecosistema” no ano 2
Fonte: ReCiPe (2016).



Figura A3.2 – Locais impactados para a área de proteção “Saúde Humana” no ano 2
Fonte: ReCiPe (2016).

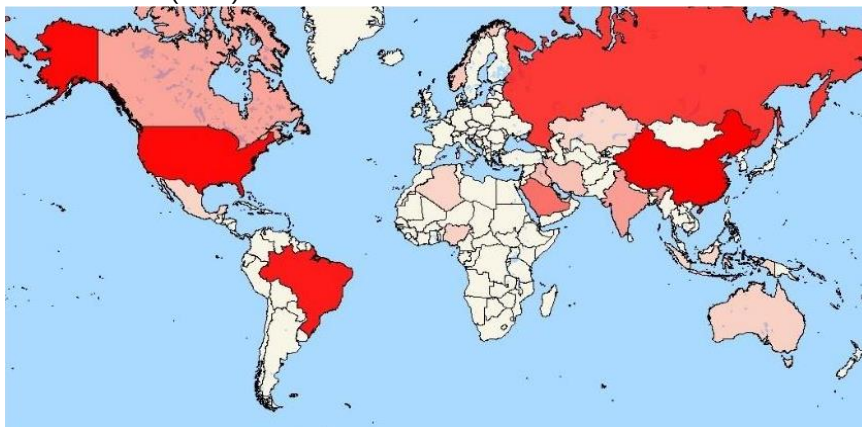


Figura A3.3 – Locais impactados para a área de proteção “Recursos Naturais” no ano 2
Fonte: ReCiPe (2016).

Ano 3 (etapa de construção)

Figura A3.4 – Locais impactados para a área de proteção "Ecossistema" no ano 3
Fonte: ReCiPe (2016).



Figura A3.5 – Locais impactados para a área de proteção "Saúde Humana" no ano 3
Fonte: ReCiPe (2016).

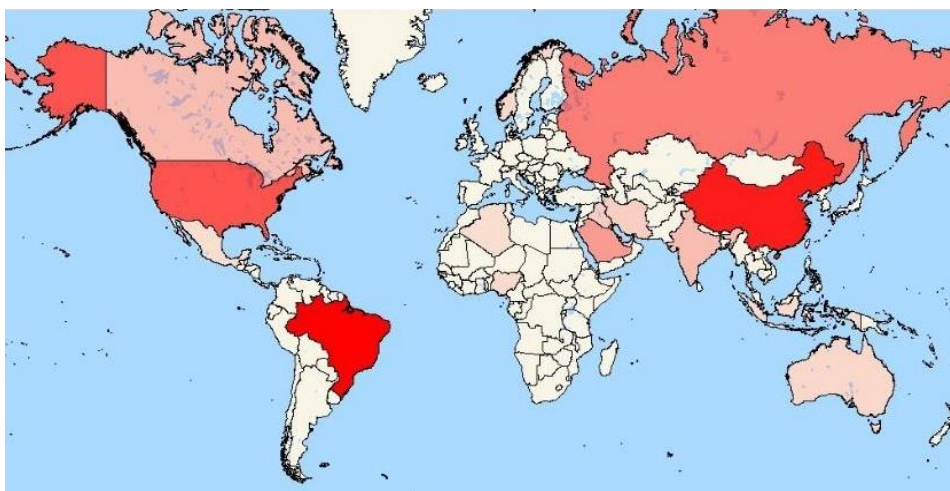


Figura A3.6 – Locais impactados para a área de proteção "Recursos Naturais" no ano 3
Fonte: ReCiPe (2016).

Ano 4 (etapa de construção)

Figura A3.7 – Locais impactados para a área de proteção “Ecosistema” no ano 4
Fonte: ReCiPe (2016).



Figura A3.8 – Locais impactados para a área de proteção “Saúde Humana” no ano 4
Fonte: ReCiPe (2016).

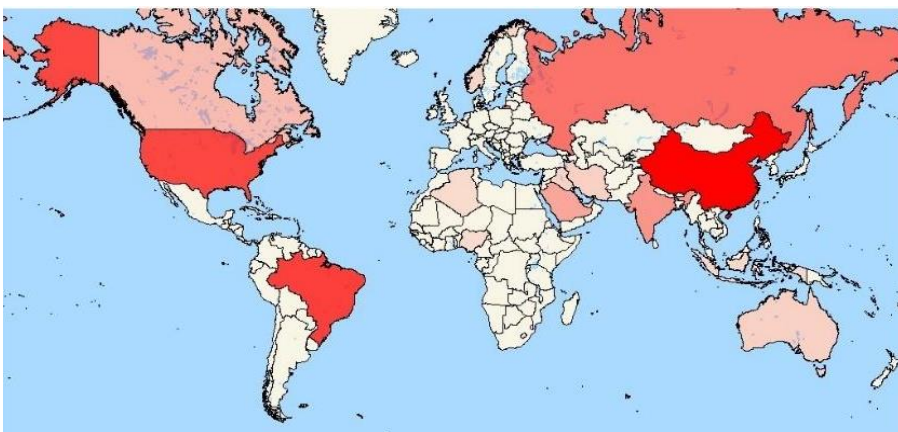


Figura A3.9 – Locais impactados para a área de proteção “Recursos Naturais” no ano 4
Fonte: ReCiPe (2016).

Ano 5 (etapa de construção)

Figura A3.10 – Locais impactados para a área de proteção “Ecossistema” no ano 5
Fonte: ReCiPe (2016).



Figura A3.11 – Locais impactados para a área de proteção “Saúde Humana” no ano 5
Fonte: ReCiPe (2016).



Figura A3.12 – Locais impactados para a área de proteção “Recursos Naturais” no ano 5
Fonte: ReCiPe (2016).

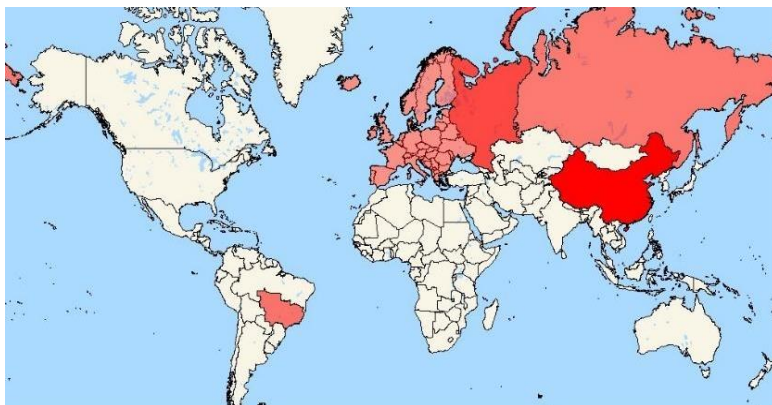
Anos 6-55 (etapa de O&M)

Figura A3.13 – Locais impactados para a área de proteção “Ecossistema” no ano 6-55
Fonte: ReCiPe (2016).

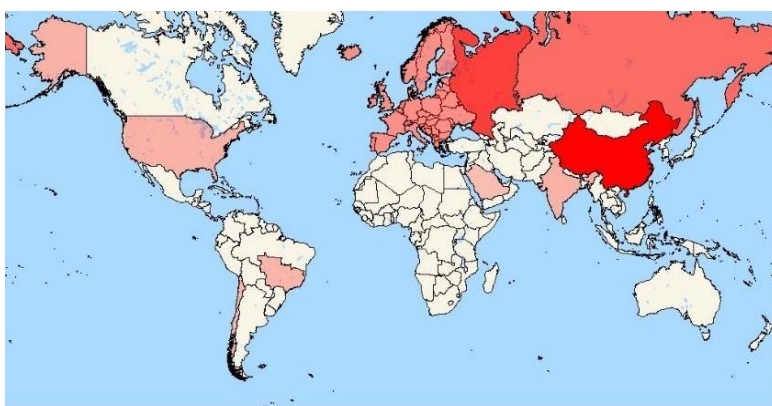


Figura A3.14 – Locais impactados para a área de proteção “Saúde Humana” no ano 6-55
Fonte: ReCiPe (2016).

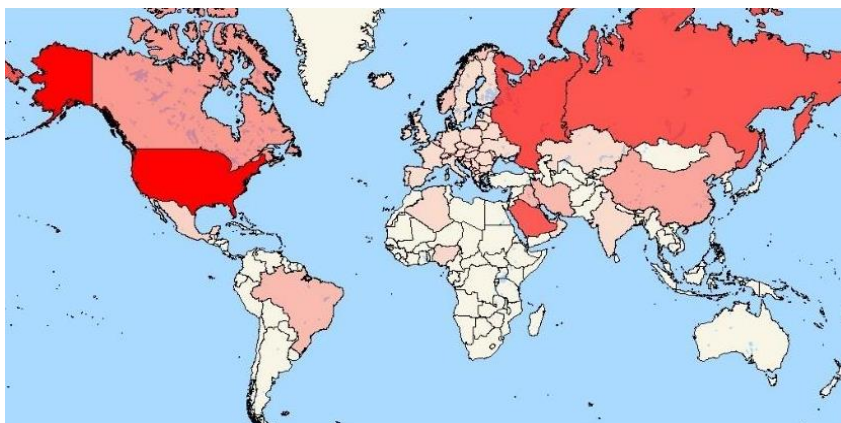


Figura A3.15 – Locais impactados para a área de proteção “Recursos Naturais” no ano 6-55 (O&M)
Fonte: ReCiPe (2016).

Anos 56-60 (etapa de descomissionamento)

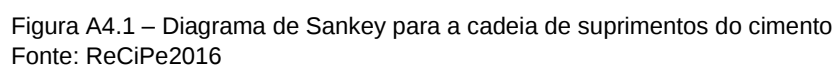
Figura A3.16 – Locais impactados para a área de proteção “Ecosistema” no ano 56-60
Fonte: ReCiPe (2016).



Figura A3.17 – Locais impactados para a área de proteção “Saúde Humana” no ano 56-60
Fonte: ReCiPe (2016).



Figura A3.18 – Locais impactados para a área de proteção “Recursos Naturais” no ano 56-60
Fonte: ReCiPe (2016).



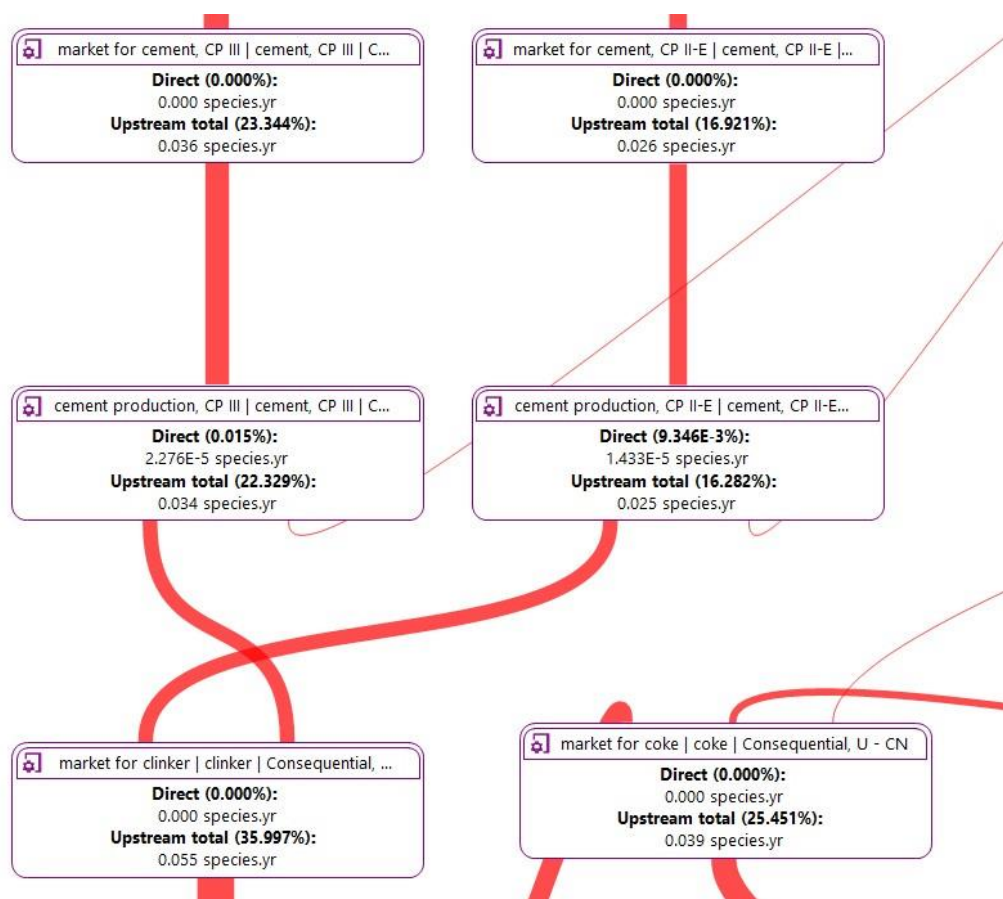


Figura A4.2 – Diagrama de Sankey para a cadeia de suprimentos do cimento considerando China (CN) - parcial (zoom da figura anterior)
 Fonte: ReCiPe2016

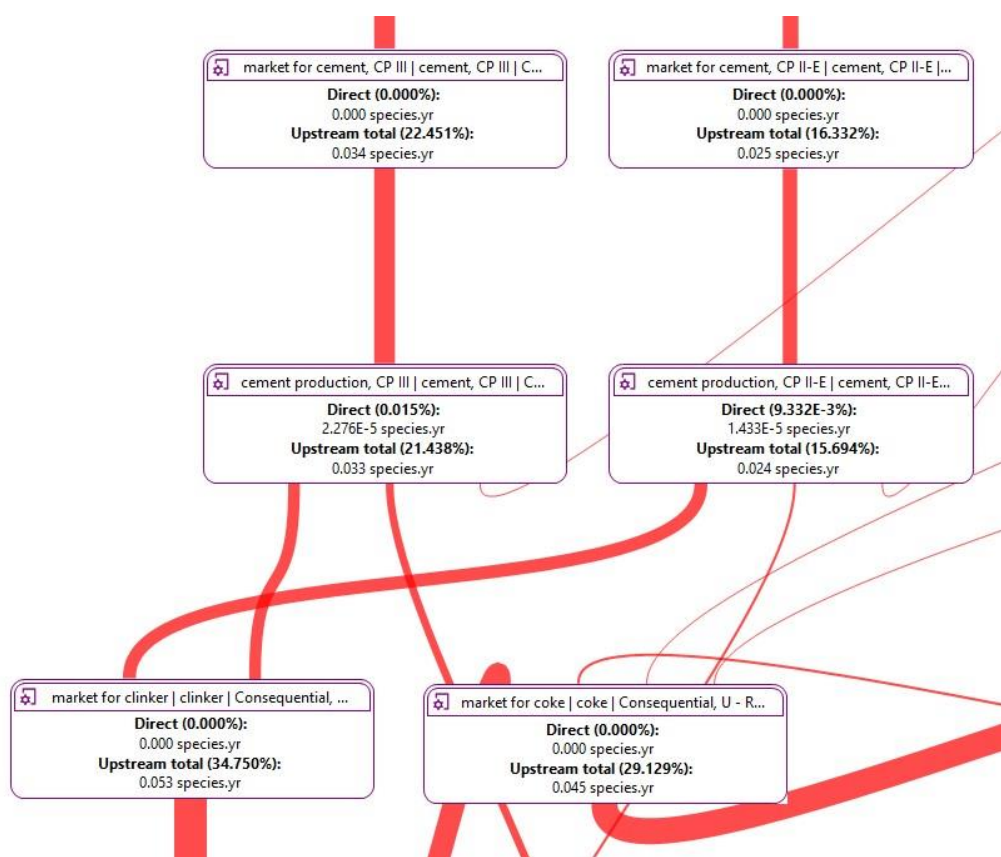


Figura A4.3 – Diagrama de Sankey para a cadeia de suprimentos do cimento considerando Resto do Mundo (RoW) - parcial
 Fonte: ReCiPe2016