

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Alana Moreira Ananias

**Impactos ambientais da construção e operação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no  
Brasil**

Florianópolis

2022

Alana Moreira Ananias

**Impactos ambientais da construção e operação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no  
Brasil**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Mohedano

Florianópolis

2022

### Ficha de identificação da obra

Ananias, Alana Moreira

Impactos ambientais da construção e operação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil / Alana Moreira Ananias ; orientador, Rodrigo de Almeida Mohedano, 2022.

72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Usina Hidrelétrica Reversível. 3. Impactos Ambientais. 4. Avaliação do Ciclo de Vida. I. Mohedano, Rodrigo de Almeida . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Alana Moreira Ananias

**Impactos ambientais da construção e operação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no  
Brasil**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 01 de agosto de 2022.

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Elisa Magri, Dr<sup>a</sup>.  
Coordenadora do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Rodrigo de Almeida Mohedano, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Tadeu Maia Portela Nogueira  
Avaliador

Matheus Willinghoefer  
Avaliador

Este trabalho é dedicado à minha família e aos meus queridos amigos.

## AGRADECIMENTOS

Escrever estes agradecimentos não é fácil porque, no momento que penso nas pessoas que me ajudaram nessa caminhada, vem tantas pessoas incríveis na minha mente que fica até difícil colocar no papel. Mas o primeiro agradecimento é, sem dúvidas, à minha mãe, Edelita, meu exemplo de vida, a mulher que me apoia até nas minhas maiores loucuras. Agradeço também à minha irmã, Inara, que por coincidência é minha melhor amiga, ao meu pai, Antônio, à minha tia Edelvita, à tia Josefa, à tia Bia, à tia Edna, que me incentivou a escolher a UFSC para chamar de minha escolinha, e aos meus tios Edson e Edivaldo. Também agradeço aos meus primos: Kauiza, Katiusca, Natália, Jamila, Fátima, Danielle, Denise, Douglas, Lucas, Lauren, Kayran e Ryan, que são presentes na minha vida.

Agradeço aos meus amigos do curso de Engenharia Civil, em especial à Ju e à Dani. Agradeço aos meus amigos de Engenharia Sanitária e Ambiental, em especial à Amanda, Bibiana e Marina. Agradeço aos meus amigos da Nova Engevix: Bruna, Brunella, Erica, Izabela, Daniela, Marcelo, Matheus, Gabriel, Fernando e Anaximandro. Agradeço aos amigos que se tornaram família durante o meu intercâmbio: Bárbara, Nina, Jack, Paulo, Erick e Jonas. Agradeço às minhas queridas amigas: Evelyn, Thau, Ana, Lê, Raquel, Bia e Helo.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina, que me proporcionou um ensino de qualidade e gratuito. Agradeço também à Universidade Politécnica de Valência pela recepção durante meu intercâmbio acadêmico. Agradeço todos os professores e professoras, especialmente, ao meu orientador Rodrigo Mohedano.

## RESUMO

Com a inserção de novas fontes de Energias Renováveis Variáveis (ERV), como eólica e solar, na matriz elétrica brasileira surgem incertezas no que concerne o equilíbrio entre a oferta e a demanda de eletricidade, de forma eficiente e sustentável. As Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) surgem como uma alternativa para o armazenamento de energia sem que haja necessidade de investimento em combustíveis fósseis. Esse tipo de empreendimento se diferencia das Usinas Hidrelétricas Convencionais (UHE) devido a existência de dois reservatórios de água, em diferentes níveis. Nas UHRs a água é transportada do reservatório inferior para o superior, por bombeamento, em períodos de menor demanda de eletricidade. Também conhecidas como baterias de água, as UHRs já somam mais de 160.000 MW em capacidade de armazenamento em empreendimentos distribuídos por quatro continentes. Neste trabalho, realizou-se uma revisão de literaturas com o objetivo de analisar os impactos ambientais que poderão ser causados pela construção e operação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil, além de expor as oportunidades e desafios dessa tecnologia de armazenamento de energia. Ademais, o estudo traz a abordagem da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta de apoio de decisão e análise do desempenho ambiental de UHRs. A realização da análise quali-quantitativa dos impactos ambientais permitiu identificar a geração de energia como principal efeito positivo e alteração da estrutura populacional da ictiofauna, fragmentação e perda de habitats naturais, perda de áreas produtivas e alteração de qualidade das águas como principais impactos negativos da construção e operação de UHRs no Brasil. O estudo destaca, também, a necessidade da avaliação dos impactos causados pelos materiais utilizados nos condutos e turbinas, além da notoriedade do tipo de energia utilizada no bombeamento para a avaliação desempenho ambiental do empreendimento. Por fim, destaca-se a importância do estudo das características do projeto e da região em que o empreendimento será implementado para a identificação dos impactos ambientais causados. Além disso, conclui que a ACV não pode ser usada como ferramenta única e a realização do EIA é primordial para o estudo de impactos ambientais de empreendimentos hidrelétricos.

**Palavras-chave:** Usina Hidrelétrica Reversível. Impactos Ambientais. ACV.

## ABSTRACT

The increase in the insertion of Variable Renewable Energies (VRE), such as wind and solar, in the electricity grid inserts uncertainties regarding the balance between electricity supply and demand in an efficient and sustainable manner. Pumped Storage Hydropower (PSH) plants emerge as an alternative to energy storage without the need for investment in fossil fuels. This type of enterprise differs from conventional hydroelectric plants due to the existence of two water reservoirs at different levels. Also known as water batteries, PSHs already total more than 160.000 MW in storage capacity in developments spread across four continents. In this work, a literature review was carried out with the objective of analyzing the environmental impacts that may be caused by the construction and operation of Reversible Hydroelectric Power Plants in Brazil, in addition to exposing the opportunities and challenges of this energy storage technology. In addition, the study brings the Life Cycle Assessment (LCA) approach as a tool to support decision and analyze the environmental performance of PSHs. The qualitative-quantitative analysis of environmental impacts allowed identifying energy generation as the main positive effect and alteration of the population structure of ichthyofauna, fragmentation and loss of natural habitats, loss of productive areas and change in water quality as the main negative impacts of the construction and operation of PSHs in Brazil. The study also highlights the need to evaluate the impacts caused by the materials used in the conduits and turbines, in addition to the notoriety of the type of energy used in pumping for the environmental performance evaluation of the enterprise. Finally, we highlight the importance of studying the characteristics of the project and the region in which the project will be implemented to identify the environmental impacts caused.

**Keywords:** Pumped Storage Hydropower. Environmental impacts. LCA.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Vista geral Usina Marmelos Zero, a jusante do barramento.....	19
Figura 2 – Detalhe do barramento da Usina Marmelos Zero .....	19
Figura 3 – Distribuição Geográfica de UHEs no Brasil .....	19
Figura 4 – Capacidade total instalada entre 1900 e 2017 .....	22
Figura 5 – Funcionamento UHR .....	23
Figura 6 – UHRs– UHRs: Circuito fechado e aberto .....	24
Figura 7– Previsão da capacidade a ser instalada entre os 2017 e 2030 .....	28
Figura 8– Capacidade Instalada: UHRs no mundo .....	29
Figura 9 – Energia Armazenada: UHRs no mundo.....	30
Figura 10 – Armazenamento de energia: principais tecnologias .....	32
Figura 11 – Referências por país .....	40
Figura 12 – Localização dos estudos selecionados .....	41
Figura 13 – Solução tecnológica: Tabela dinâmica.....	45
Figura 14– Solução tecnológica: Gráfico dinâmico .....	45
Figura 15 - Impactos Ambientais Positivos UHEs.....	46
Figura 16 – Impactos Ambientais Positivos UHRs.....	47
Figura 17 – Impactos Ambientais Positivos: UHEs e UHRs .....	48
Figura 18 - Impactos Ambientais Negativos UHEs .....	50
Figura 19 - Impactos Ambientais Negativos UHEs (Continuação) .....	51
Figura 20- Impactos Ambientais Negativos UHRs.....	52
Figura 21 - Impactos Ambientais Negativos UHEs e UHRs .....	53
Figura 22 - Impactos Ambientais Negativos UHEs e UHRs (continuação) .....	54
Figura 23 - Variação do Nível de Água (NA) do Reservatório.....	57

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Diferentes tipos de ciclos de UHR .....	25
Quadro 2 – Parâmetros e resultados que influenciam a ACV .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade instalada e volume útil: grandes hidrelétricas brasileiras .....	21
Tabela 2 – UHRs no Brasil.....	31
Tabela 3 - Comparação de tecnologias para armazenamento de energia por 1.000/100 MW e 4 horas de duração .....	33
Tabela 4 – Acervos de entidades governamentais consultados.....	39
Tabela 5 - UHEs selecionadas.....	41
Tabela 6 - UHRs selecionadas.....	42
Tabela 7 – Acréscimo na concentração de Sólidos totais .....	56
Tabela 8 – Análise qualitativa: impactos positivos .....	58
Tabela 9 – Classificação magnitude: Espanha e Brasil.....	58
Tabela 10 – Análise qualitativa: impactos negativos .....	59
Tabela 11 – Oportunidades observadas para UHRs.....	61
Tabela 12 – Desafios das UHRs.....	62

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACV Avaliação de Ciclo de Vida  
AIA Avaliação de Impacto Ambiental  
ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica  
APA Agência Portuguesa do Ambiente  
BEN Balanço Energético Nacional  
CAPEX Despesas de capital  
CONAMA Conselho Nacional de Meio Ambiente  
EIA Estudo de Impacto Ambiental  
EPA Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos  
EPE Empresa de Pesquisa Energética  
ERV Energia Renovável Variável  
EUA Estados Unidos da América  
IBAMA Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis  
IFPSH Fórum Internacional de Usinas Hidrelétricas Reversíveis  
IHA Associação Internacional de Hidrelétricas  
MAPA Ministério da Agricultura, Alimentação e Meio Ambiente  
MITECO Ministério para Transição Ecológica e o Desafio Demográfico  
MW Megawatts  
NHA Associação Nacional de Hidrelétricas  
ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico  
PNMA Política Nacional do Meio Ambiente  
PNRH Política Nacional de Recursos Hídricos  
RIMA Relatório de Impacto Ambiental  
UHE Usina Hidrelétrica  
UHR Usina Hidrelétrica Reversível

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
1.1.1	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	GERAÇÃO HIDRELÉTRICA .....	18
2.2	CENTRAIS HIDRELÉTRICAS A FIO D'ÁGUA .....	20
2.3	CENTRAIS HIDRELÉTRICAS COM RESERVATÓRIO DE ACUMULAÇÃO 21	
2.4	CENTRAIS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS .....	22
2.4.1	<b>Breve Histórico.....</b>	<b>22</b>
2.4.2	<b>Funcionamento das UHRs .....</b>	<b>23</b>
2.4.3	<b>UHRs no mundo.....</b>	<b>27</b>
2.4.4	<b>UHRs no Brasil .....</b>	<b>31</b>
2.4.5	<b>Alternativas para o armazenamento de energia .....</b>	<b>32</b>
2.5	IMPACTOS AMBIENTAIS NA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA .....	33
2.5.1	<b>Abordagem da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em UHR .....</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>38</b>
3.1	AQUISIÇÃO DE DADOS PARA A ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS 39	
3.1.1	<b>Consulta em Banco de Dados .....</b>	<b>39</b>
3.1.2	<b>Seleção de documentos .....</b>	<b>40</b>
3.1.3	<b>Organização e apresentação dos dados extraídos.....</b>	<b>42</b>
3.1.4	<b>Soluções tecnológicas .....</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>46</b>
4.1	ANÁLISE QUANTITATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS .....	46

<b>4.1.1</b>	<b>IMPACTOS AMBIENTAIS POSITIVOS .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1.2</b>	<b>IMPACTOS AMBIENTAIS NEGATIVOS .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>ANÁLISE QUALITATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2.1</b>	<b>IMPACTOS AMBIENTAIS POSITIVOS .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3</b>	<b>AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM UHRs .....</b>	<b>60</b>
<b>4.4</b>	<b>RISCOS E OPORTUNIDADES DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS</b>	
	<b>61</b>	
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira, diferente da matriz elétrica mundial, é composta em grande parte por fontes renováveis e, além de possuírem menores custos de produção, a energia gerada a partir desse tipo de fonte, em geral, emite menos gases do efeito estufa (EPE, 2021).

Segundo o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2020a), a matriz elétrica brasileira é composta, principalmente, pela geração hidráulica, responsável por cerca de 65% da geração de energia elétrica do país.

O Plano Decenal de Expansão Energética -PDE2030- (BRASIL, 2020b), prevê que população brasileira alcance os 225,4 milhões de habitantes no ano de 2030, crescimento de 0,6% a.a., em média. O PDE prevê um acréscimo de 13 milhões de domicílios entre os anos de 2019 e 2030. Ainda segundo o PDE, a matriz de energia elétrica apresentará maior diversidade em 2030.

A diversificação da matriz elétrica brasileira com a implementação de novos parques eólicos e fotovoltaicos é de suma importância para o atendimento da demanda de energia do país, no entanto, cabe ressaltar que estes meios de geração provêm de recursos que apresentam intermitência e, segundo Pitre (2015), o aumento da sua penetração na rede insere uma variabilidade que plantea novos desafios na tarefa de garantir o equilíbrio entre a oferta e a demanda de eletricidade da forma mais eficiente.

Em consequência, se necessitam implementar mecanismos para garantir a segurança e o mínimo custo de operação do sistema (Pitre, 2015). As Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) já são apontadas como uma solução para o armazenamento de energia em diversos países. As UHRs constituem uma tecnologia que permite oferta de potência com flexibilidade necessária para o atendimento à variação de carga (EPE, 2019).

As UHRs se diferenciam das Usinas Hidrelétricas convencionais pela existência de dois reservatórios, um inferior e um superior e, além de possuírem turbina para geração, as UHRs necessitam de bombas para o transporte da água do reservatório inferior para o superior.

Segundo a International Water Power & Dam Construction (2012 apud CANALES et al. 2014), já foram construídas quatro Usinas Reversíveis no Brasil, sendo a mais recente delas inaugurada em 1955. No contexto mundial, existem mais de 270 plantas de UHR em operação (NHA, 2021).

Conhecidas como bateria de água, o armazenamento de energia em UHR é a forma mais limpa e econômica existente hoje (IHA, 2022a). No entanto, segundo Serra e Oliveira

(2020), estudos mostram que os custos ambientais e sociais da implantação de hidrelétricas são consideravelmente altos e apesar da eficiência energética, esse sistema está longe de gerar uma energia socioambientalmente responsável.

Ressalta-se que até os anos de 1980, não existia no Brasil uma preocupação em relação a conservação do meio socioambiental frente aos grandes projetos de engenharia (COLITO, 2000 apud CARVALHO et al. 2018). No entanto, a partir de 1981, com a promulgação da Lei Federal n 6.938, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, a compatibilização do desenvolvimento econômico e social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico se tornou um objetivo e desafio para a implementação de novos empreendimentos.

A construção e operação de usinas hidrelétricas, assim como a de qualquer grande empreendimento provoca alterações no meio ambiente físico, sociocultural e econômico (BORGES & SILVA, 2011). Sendo assim, a gestão ambiental deve começar nas fases iniciais do projeto, passando pela etapa de construção e continuar ao longo da vida útil da usina; a fim de minimizar os efeitos negativos e maximizar os benefícios do empreendimento (SOUZA, 2000).

Dentre os estudos ambientais, o mais referenciado mecanismo de avaliação ambiental é Estudo de Impacto Ambiental - EIA (CAMPOS & SILVA, 2012). Destaca-se também a Avaliação do Ciclo de Vida – ACV como uma ferramenta que permite avaliar o desempenho ambiental de um sistema ou produto (TORRES, 2011).

A ACV é uma abordagem sistêmica que permite avaliar o desempenho ambiental através do ciclo de vida de um sistema ou produto serviços (TORRES, 2011) e possui quatro fases de estudo: (a) definição de metas e escopo; (b) análise de inventário; (c) avaliação de impacto; (d) interpretação.

Deste modo, o presente estudo visa analisar os impactos ambientais descritos em estudos sobre UHR, comparando com as UHE convencionais para subsidiar a tomada de decisão em empreendimentos futuros.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar os principais impactos ambientais causados pela construção e operação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil em comparação com Usinas convencionais, identificando riscos e oportunidades.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar e analisar os principais impactos ambientais descritos em literatura para as UHR;
- Comparar os principais impactos ambientais de Usinas Hidrelétricas Convencionais com reservatório de acumulação e Usinas Hidrelétricas Reversíveis;
- Apresentar e discutir a abordagem do ciclo de vida para estudos de impacto ambiental de Usinas Hidrelétricas Reversíveis.
- Identificar os riscos e oportunidades da implantação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

A energia aportada pela água vem sendo aproveitada pela humanidade há milênios. O domínio da agricultura na Mesopotâmia desde 4.000 a.C. implicou na necessidade de transportar água aos campos distantes dos rios, motivo pelo qual foram obrigados a construir canais com barragens de derivação nos cursos d'água (MAPA, 2022).

Segundo Jansen (1983), registros do historiador Heródoto apontam que a cidade de Memphis, construída pelo Faraó Menés junto ao rio Nilo, possuía uma barragem de alvenaria a 20 km à montante do local planejado para a capital. Estima-se que a construção de Memphis ocorreu entre 5.700 e 2.700 d.C.

As rodas d'água, dispositivos conhecidos pelos romanos desde o século I a.C, passaram a ser extensamente utilizadas a partir do século XIV em trabalhos de moagem, serrarias e para a alimentação de fábricas têxteis, e ao final do século XVIII existiam cerca de 10.000 rodas d'água na Inglaterra (PEREIRA, 2015).

Segundo Pereira (2015), durante os séculos XVIII e XIX, com o surgimento de tecnologias como a máquina a vapor, o motor, o dínamo, a lâmpada e a turbina hidráulica, tornou-se possível converter a energia mecânica em energia elétrica. Por volta de 1825 aparecem as primeiras turbinas que usam um circuito de água pressurizada, usando essas máquinas para mover sistemas de polias para dar movimento a grandes indústrias, de todos os tipos (MAPA, 2022).

Em 1880 as turbinas hidráulicas começaram a ser conectadas a geradores de energia elétrica, aparecendo assim as primeiras usinas hidrelétricas com um design simples e que são melhoradas até hoje. As linhas de alta tensão apareceram a princípios do século XX e permitiram a construção de grandes aproveitamentos hidrelétricos por todo o mundo. (MAPA, 2022).

Em 1886 foi instalada a primeira hidrelétrica nas cataratas do Niágara, localizada na fronteira do Canadá com os Estados Unidos (BORGES & SILVA, 2011). No Brasil, a primeira usina hidrelétrica entrou em operação no fim do século XIX. O empreendimento, construído no ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, na cidade de Diamantina (MG) (PEREIRA, 2015).

Em 1889, foi inaugurada no rio Paraibuna, em Minas Gerais, a primeira usina de grande porte na América do Sul, a usina Marmelos (OLIVEIRA, 2018). Observa-se nas Figura 1 e Figura 2 a usina Marmelos Zero.

Figura 1– Vista geral Usina Marmelos Zero, a jusante do barramento



Fonte: PEREIRA (2015)

Figura 2 – Detalhe do barramento da Usina Marmelos Zero



Fonte: PEREIRA (2015)

Segundo dados da ONS (2022), a capacidade instalada de energia elétrica proveniente de geração hidráulica no Brasil em 2022 é de 108.880 MW. A distribuição geográfica das UHE brasileiras está exposta na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição Geográfica de UHEs no Brasil



Fonte: ONS (2022)

Segundo MAPA (2022), a energia hidrelétrica tem adicionado valores em comparação com outros sistemas de geração de energia, derivados de sua flexibilidade, simplicidade e a menor emissões poluentes.

No contexto de geração de energia a partir da água e no que concerne a característica do reservatório, têm-se três tipos de centrais hidrelétricas:

- Centrais hidrelétricas à fio d'água;
- Centrais hidrelétricas com reservatório de acumulação;
- Centrais hidrelétricas reversíveis.

## 2.2 CENTRAIS HIDRELÉTRICAS A FIO D'ÁGUA

As centrais hidrelétricas a fio d'água geram energia elétrica a partir do fluxo de água dos rios, com pouca ou nenhuma capacidade de regularização (GOMES, 2012). Por não terem capacidade de armazenamento, geram a energia limitada à vazão afluente a cada instante e, desta forma, não são capazes de manter a geração em períodos de baixa afluência (CARVALHO, 2015).

Segundo Gomes (2012, apud SOARES, 2017), as restrições ambientais no Brasil são determinantes para adoção de projetos com elevada capacidade instalada e baixa ou nenhuma capacidade de armazenamento, como é o caso das usinas a fio d'água.

Uma das principais vantagens desse tipo de central hidrelétrica é a menor área de alagamento, conseqüentemente menores impactos ambientais e o menor rigor de órgãos ambientais. Esse tipo de empreendimento se destaca no Norte no país, na região amazônica.

Um dos principais exemplos de usina a fio d'água no Brasil é a Usina Hidrelétrica Belo Monte, localizada no estado do Pará. Caracterizada por ter dois reservatórios interligados por um Canal de Derivação, o arranjo possui uma área de reservatório de 478 km<sup>2</sup>, área muito diferente do projeto original apresentado em 1989, que previa o alagamento de 1.225km<sup>2</sup>, e foi reduzida para evitar o alagamento de terras indígenas (NORTE ENERGIA, 2022).

A usina binacional Itaipu também é considerada a fio d'água e sua barragem serve, principalmente, para produzir o desnível necessário para o acionamento das turbinas, já que seu reservatório tem pequeno volume quando comparado com a vazão do rio (ITAIPU, 2022).

Do ponto de vista energético, a limitação da expansão do Sistema Elétrico a usinas fio d'água se traduz em uma redução da capacidade de armazenamento de energia do sistema,

podendo repercutir em um aumento da participação de fontes térmicas na matriz de geração em situações de secas prolongadas (OCHOA, DETZEL e MINE, 2017).

### 2.3 CENTRAIS HIDRELÉTRICAS COM RESERVATÓRIO DE ACUMULAÇÃO

As centrais hidrelétricas com reservatório de acumulação geram energia elétrica a partir de água acumulada em reservatórios (GOMES, 2012). Dentre os benefícios dos reservatórios, pode-se citar o controle de enchentes, o aumento de vazões mínimas em momentos de grande escassez e a ampliação da área disponível para captação de água para diversos fins (CARVALHO, 2015).

Uma das características fundamentais desse tipo de empreendimento é a facilidade de seu comissionamento. Em apenas 90 segundos, a potência máxima pode ser gerada a partir de uma situação de desligamento total. Neste momento, as válvulas de proteção do grupo são abertas, a máquina é acelerada para atingir a velocidade sincronizada da rede, é acoplada ao sistema, e o distribuidor de fluxo é aberto ao máximo permitido (MAPA, 2022).

Ainda segundo o MAPA (2022), nenhum outro elemento de produção de energia começa a geração de energia com essa facilidade e velocidade, sendo muito útil para resolver situações de desacoplamento da rede de sistemas de produção de energia em massa; usinas térmicas, ciclos combinados, nuclear, eólica etc.

A Tabela 1 apresenta cinco grandes hidrelétricas com suas respectivas potências instaladas e volume útil dos reservatórios. Dentre as UHE, Sobradinho, Tucuruí e Serra Mesa possuem reservatório de acumulação enquanto Itaipu e Belo Monte são usinas a fio d'água.

Tabela 1 – Capacidade instalada e volume útil: grandes hidrelétricas brasileiras

Nome	Subsistema	Operação	Potência Instalada (MW)	Volume Útil (hm <sup>3</sup> )
Sobradinho	Nordeste	1980	1.050	28.669
Tucuruí	Norte	1984	8.370	38.982
Serra Mesa	Sudeste	1998	1.275	43.250
Itaipu	Sudeste	1984	14.000	1.709
Belo Monte	Norte	2016	11.233	0

Fonte: adaptado de BERTONE et al (2022)

## 2.4 CENTRAIS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS

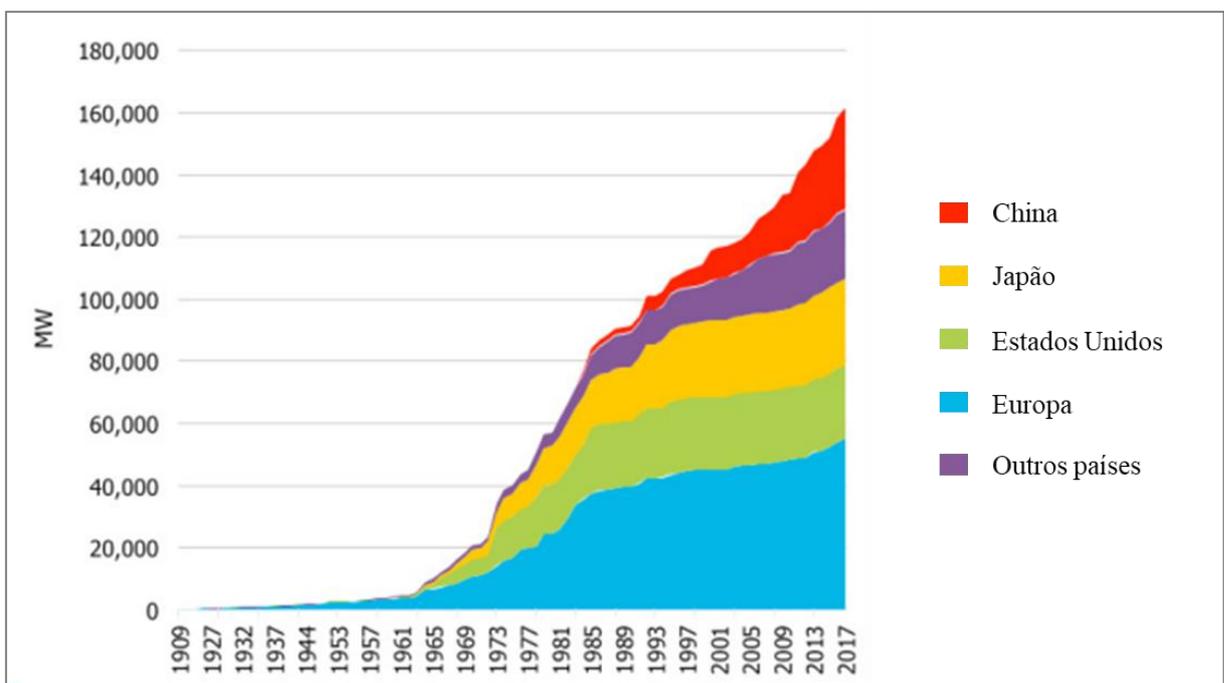
### 2.4.1 Breve Histórico

Segundo TORRES (2011), a primeira Usina Hidrelétrica Reversível do mundo foi construída em Schaffhausen, região dos Alpes, na Suíça, durante a primeira década do século XX, no ano de 1907.

Desde as primeiras centrais reversíveis até os dias atuais, as UHRs têm desempenhado diferentes papéis nos mercados mundiais de energia elétrica, sendo destacada sua relação com o desenvolvimento das usinas nucleares entre as décadas de 1960 e 1980 e o suporte à penetração das energias renováveis não controláveis, como as usinas eólicas e fotovoltaicas, a partir de 2000 (EPE, 2019).

Segundo IHA (2018), até o fim do ano de 2017 as UHRs eram responsáveis por mais de 94% da capacidade de armazenamento de energia global, somando um total 161.000 MW, sendo a China responsável pela adição de 15.000 MW desse total entre os anos de 2010 e 2017. Na Figura 4 observa-se a capacidade instalada de UHRs entre os anos de 1900 e 2017.

Figura 4 – Capacidade total instalada entre 1900 e 2017



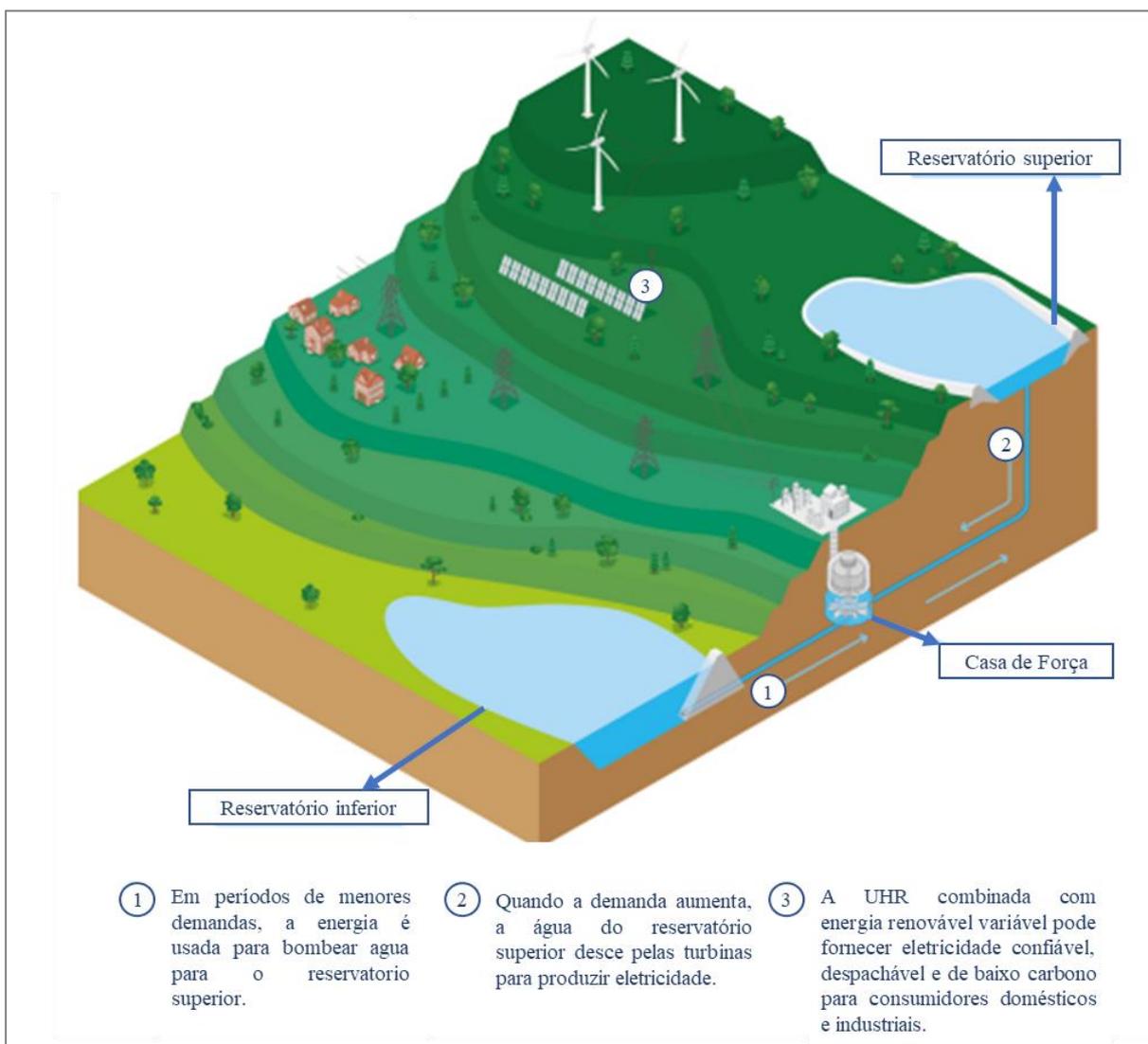
Fonte: adaptado de IHA (2018)

## 2.4.2 Funcionamento das UHRs

A central hidrelétrica reversível permite armazenar e gerar energia, atuando como um mecanismo de armazenamento mecânico, que armazena energia potencial da água que é levantada contra a gravidade, por bombeamento, empregando as diferenças gravitacionais entre dois reservatórios de armazenamento de água. (TORRES, 2011)

De forma simplificada, uma UHR possui os seguintes componentes: os reservatórios (superior e inferior), os condutos hidráulicos e as instalações eletromecânicas para bombeamento/turbinamento (CANALES et. Al., 2015). De forma simplificada, o funcionamento de uma UHR está exposto na Figura 5.

Figura 5 – Funcionamento UHR

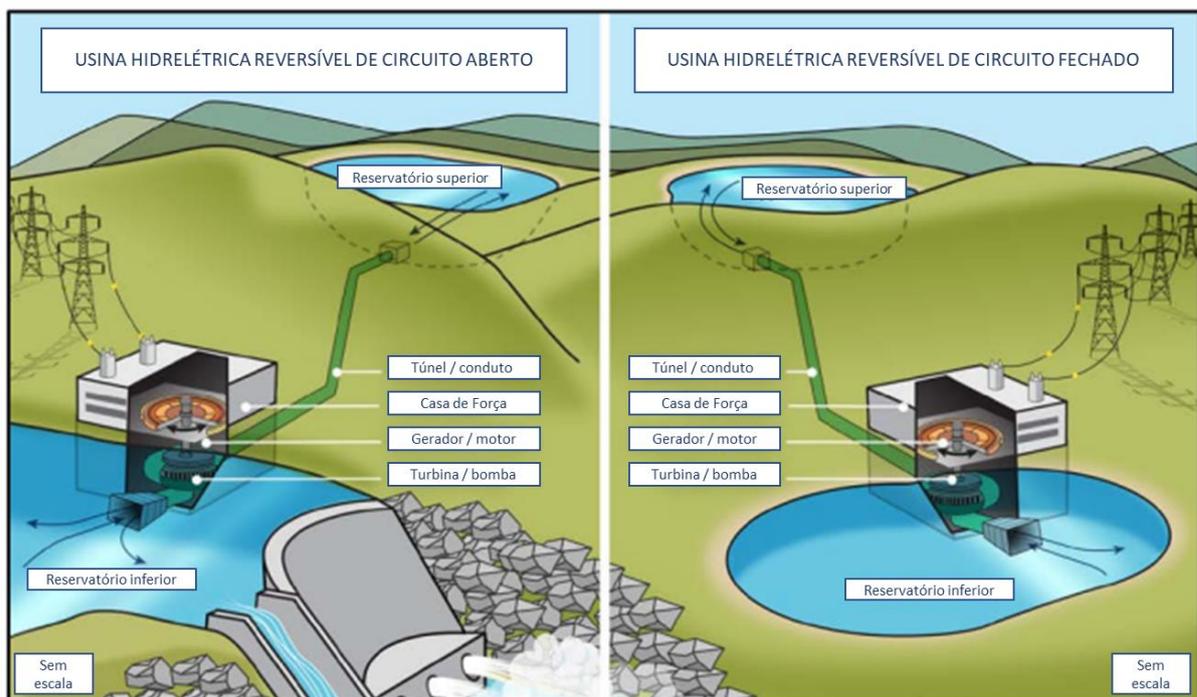


Fonte: Adaptado de IHA (2018)

Segundo IFPSH (2021), existem duas categorias principais de projetos de UHRs, as de circuito fechado e as de circuito aberto (Figura 6):

- Pura ou circuito fechado: esses projetos produzem energia apenas a partir de água que já foi bombeada anteriormente para um reservatório superior. Não há um fluxo natural significativo de água para nenhum dos reservatórios.
- Combinadas, mistas ou de circuito aberto: projetos combinados aproveitam tanto a água bombeada quanto as entradas naturais para produzir energia. Em um desenvolvimento de circuito fechado, o reservatório superior está localizado fora do fluxo, enquanto em um sistema de circuito aberto o reservatório superior está localizado no curso d'água e tem entradas naturais. Assim, em um sistema de circuito aberto, há sempre uma parte da eletricidade que pode ser gerada sem a necessidade de bombeamento, como em uma usina hidrelétrica convencional.

Figura 6 – UHRs– UHRs: Circuito fechado e aberto



Fonte: Adaptado de Departamento de Energia dos Estados Unidos (2022)

Em relação a sazonalidade, as UHRs podem ser plurianuais, sazonais, semanais ou diárias (HUNT et al., 2018). Os diferentes tipos de UHR para atender às necessidades de energia estão caracterizados no Quadro 1.

Quadro 1 Diferentes tipos de ciclos de UHR

UHR	Volume do reservatório (km <sup>3</sup> )	Modo de operação	Ocasões em que a UHR opera
Plurianual	5 - 100	Bombeamento	Superávit anual na geração hidrelétrica
			Preços anuais de combustível mais baratos que a média.
			Demanda anual de eletricidade menor do que a média.
		Geração	Déficit anual na geração hidrelétrica.
			Preços anuais de combustível mais caros que a média
			Demanda anual de eletricidade maior do que a média.
Sazonal	1 -30	Bombeamento	Estações chuvosas ou estações de derretimento de gelo, com altas geração de energia hidrelétrica.
			Verão, com alta geração de energia solar
			Estações de vento, com alta geração de energia eólica.
			Baixa temporada de demanda, quando a demanda de eletricidade reduz
		Geração	Período seco ou invernos congelantes, com baixa geração hidrelétrica
			Inverno, com baixa geração de energia solar
			Estações sem vento, com baixa geração de energia eólica
			Alta temporada de demanda, quando a demanda de eletricidade aumenta
Semanal	0,1 - 1	Bombeamento	Durante os fins de semana, quando a demanda de energia reduz.

UHR	Volume do reservatório (km <sup>3</sup> )	Modo de operação	Ocasões em que a UHR opera
			Dias de vento, com alta geração de energia eólica.
			Dias ensolarados, com alta geração de energia solar.
		Geração	Durante os dias da semana, quando a demanda de energia aumenta.
			Durante os dias da semana, quando a demanda de energia aumenta.
			Durante os dias da semana, quando a demanda de energia aumenta
		Diária	0,001 – 0.1
Dia, quando há geração de energia solar.			
Geração	Dia, quando há geração de energia solar		
	Dia, quando há geração de energia solar		

Fonte: Adaptado de Jordão (1979, apud HUNT et al., 2018)

O relatório denominado “Pumped Storage Hidropower: Capabilities and Costs”, elaborada pelo IFPSH em 2021, lista os seguintes benefícios das UHRs:

- apoiar a grande penetração de energia renovável variável (ERV), como eólica e solar, no sistema de energia, compensando sua variabilidade e fornecendo muitos serviços auxiliares necessários para operações do sistema de energia;
- fornecer grande capacidade de armazenamento de energia para armazenar, ou deslocar grandes quantidades de energia de um período para outro, contribuindo assim para uma operação estável, econômica e confiável do sistema de energia;
- ajudar a evitar ou reduzir as restrições do ERV em caso de sobregeração, ou fornecer a energia necessária em caso de subgeração devido a erros de previsão meteorológica ou durante tempos de baixa oferta de ERV;
- firmar a geração variável de energia eólica e solar em saída de energia firme;

- oferecer inércia rotativa para estabilizar o sistema de energia durante distúrbios como em caso de interrupção do gerador ou transmissão;
- reduzir as necessidades de reservas operacionais de usinas térmicas convencionais;
- reduzir o ramping, start/stops e operação de carga parcial da frota de geração convencional existente, tornando assim o funcionamento dessas unidades mais eficiente e reduzindo seu desgaste;
- fornecer serviço para restaurar o sistema de energia após um apagão.

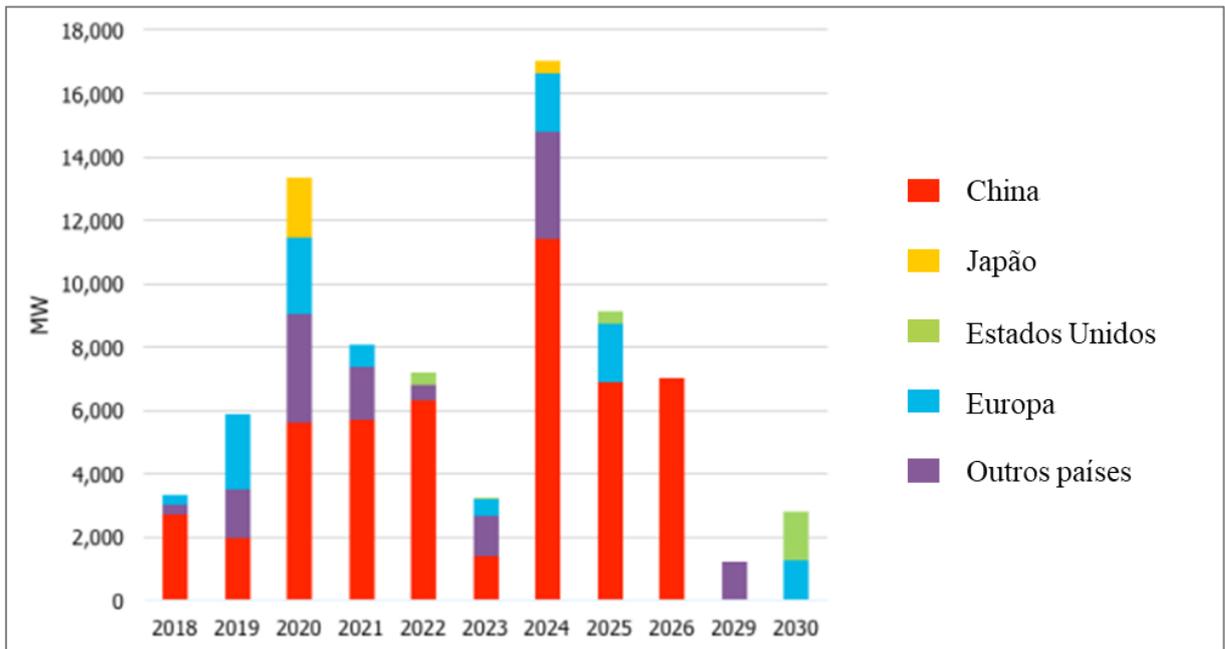
Segundo IHA (2022b), uma instalação com dois reservatórios aproximadamente do tamanho de duas piscinas olímpicas, e uma diferença de 500 metros de altura entre eles, poderia fornecer uma capacidade de 3 megawatts (MW) e armazenar até 3,5 megawatts-hora (MWh) de eletricidade.

No entanto, para um local ser atrativo para a implantação de uma UHR, os elementos-chaves são: condições topográficas e geotécnicas favoráveis; quantidade de água disponível suficiente; acesso à linhas de transmissão e energia a baixo custo (ANTAL, 2014). Atualmente, a China e os Estados Unidos lideram o ranking dos países com maior capacidade de armazenamento em UHRs.

### **2.4.3 UHRs no mundo**

Conhecida como bateria de água, o armazenamento de energia em UHR é a forma mais limpa e econômica existente hoje (IHA, 2022a). Até o ano de 2017, a capacidade de armazenamento de UHRs no mundo era cerca de 160.000 MW (IHA, 2018), e de acordo com IHA (2022b), até 2030 o armazenamento em UHRs alcançará 240.000 MW. A Figura 7 mostra a previsão da adição de capacidade instalada até o ano de 2030.

Figura 7– Previsão da capacidade a ser instalada entre os 2017 e 2030

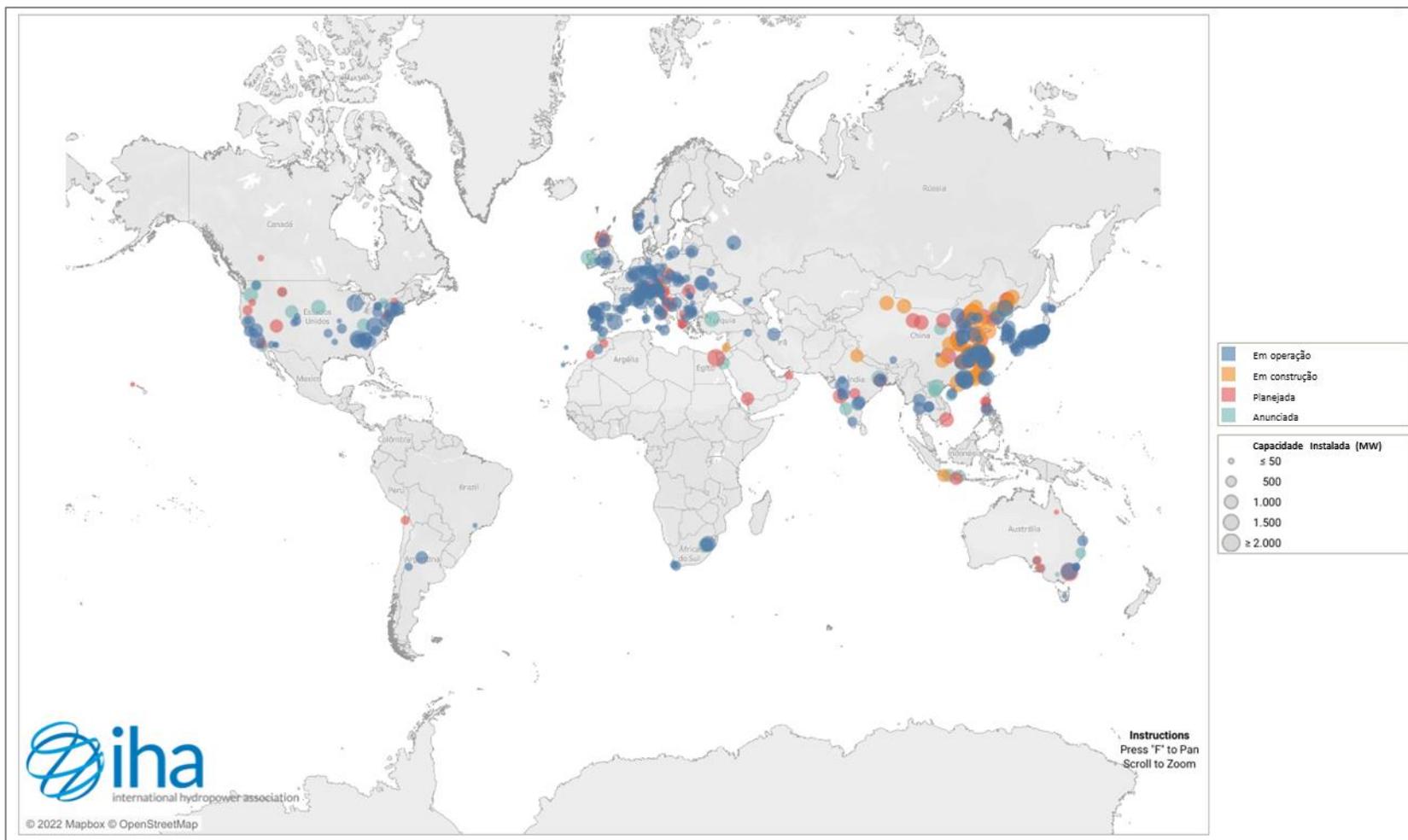


Fonte: Adaptado de IHA (2018)

Atualmente existem, aproximadamente, 270 plantas de UHR no mundo, sendo que 43 delas estão ativas nos Estados Unidos (NHA, 2021). Ainda segundo o relatório do NHA, os EUA possuem 67 projetos de UHR distribuídos por 21 estados, propostos como complementos para a energia eólica e solar.

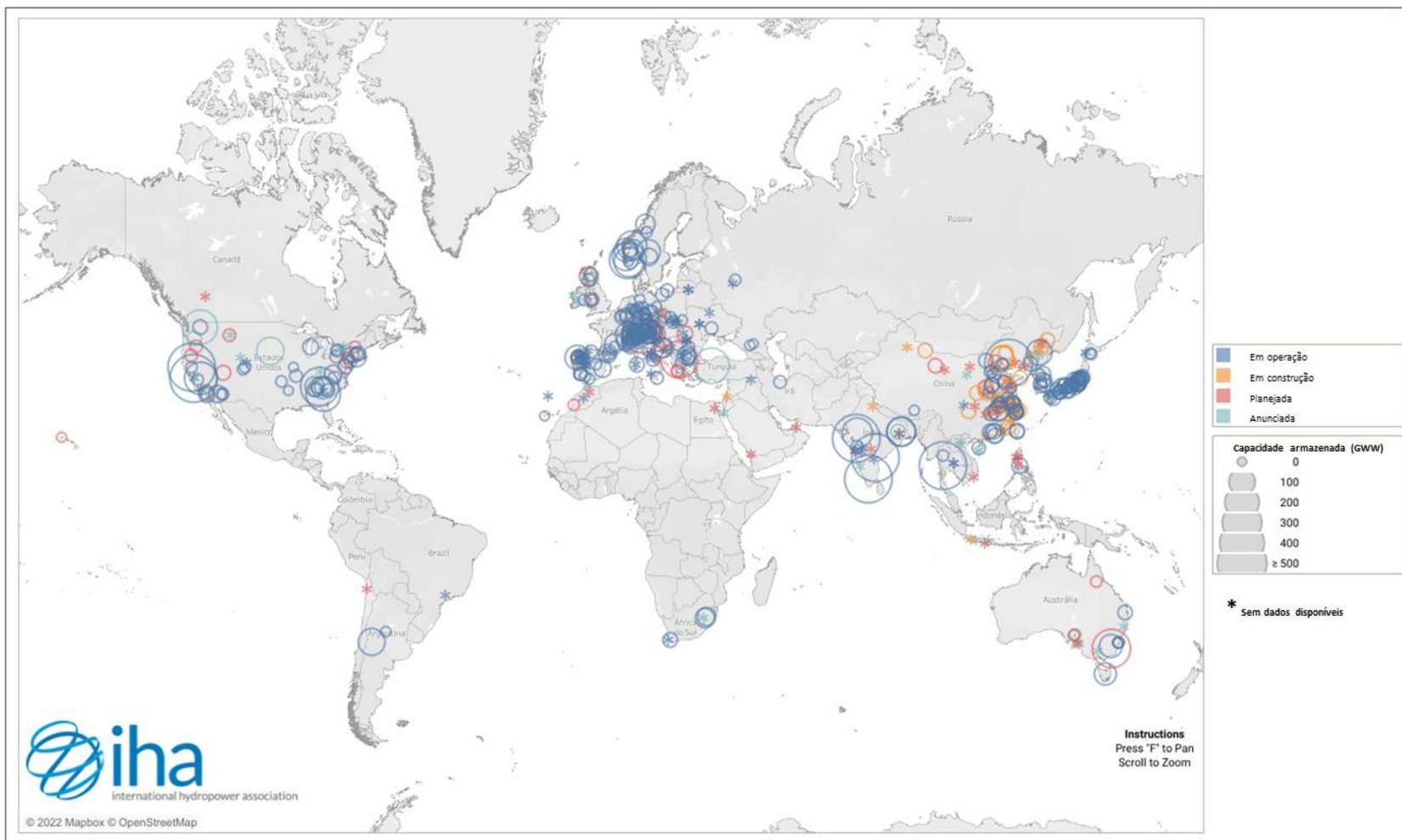
Elaborado pela Associação Internacional de Energia Hidrelétrica (IHA), a ferramenta de rastreamento de UHRs permite mapear os locais e dados das UHRs existentes e planejadas em todo o mundo. Na Figura 8 visualiza-se a capacidade (MW) de UHRs, somando os empreendimentos em operação, em construção, em projetos e anunciadas. A Figura 9 apresenta o mapa com a localização dos empreendimentos e dados referentes à energia armazenada, em GWh.

Figura 8– Capacidade Instalada: UHRs no mundo



Fonte: IHA (2022) c

Figura 9 – Energia Armazenada: UHRs no mundo



Fonte: IHA (2022) c

#### 2.4.4 UHRs no Brasil

Segundo a International Water Power & Dam Construction (2012 apud Canales et al, 2014), já foram construídas quatro Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil, sendo que três delas continuam em funcionamento até os dias atuais. Os empreendimentos, denominados Usinas Elevatórias, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – UHRs no Brasil

<b>Usina</b>	<b>Inauguração</b>	<b>Bomba/Turbina</b>	<b>Potência turbinas (MW)</b>	<b>Potência Bomba (MW)</b>	<b>Altura queda (m)</b>
<b>Pedreira</b>	1939	Francis reversível	42,6	42,6	25
<b>Traição</b>	1940	Kaplan reversível	7,3	9,4	4
<b>Vigário</b>	1952	Francis Reversível	90,8	72,0	36
<b>Edgard de Souza</b>	1955	Francis reversível	14,8	13,3	24

Fonte: Canales et Al (2014)

As usinas elevatórias da Pedreira e de Traição foram implementadas com a finalidade de aumentar a capacidade de geração da Usina Henry Borden, localizada no município de Cubatão, em São Paulo (EMAE, 2022). Segundo Lima (2012), as usinas permitiram a reversão contínua das águas do canal do Pinheiros para o reservatório Billings, no entanto, devido a degradação da qualidade do canal, foi suspenso, por tempo indeterminado, o bombeamento das águas, com exceção para o controle de cheias.

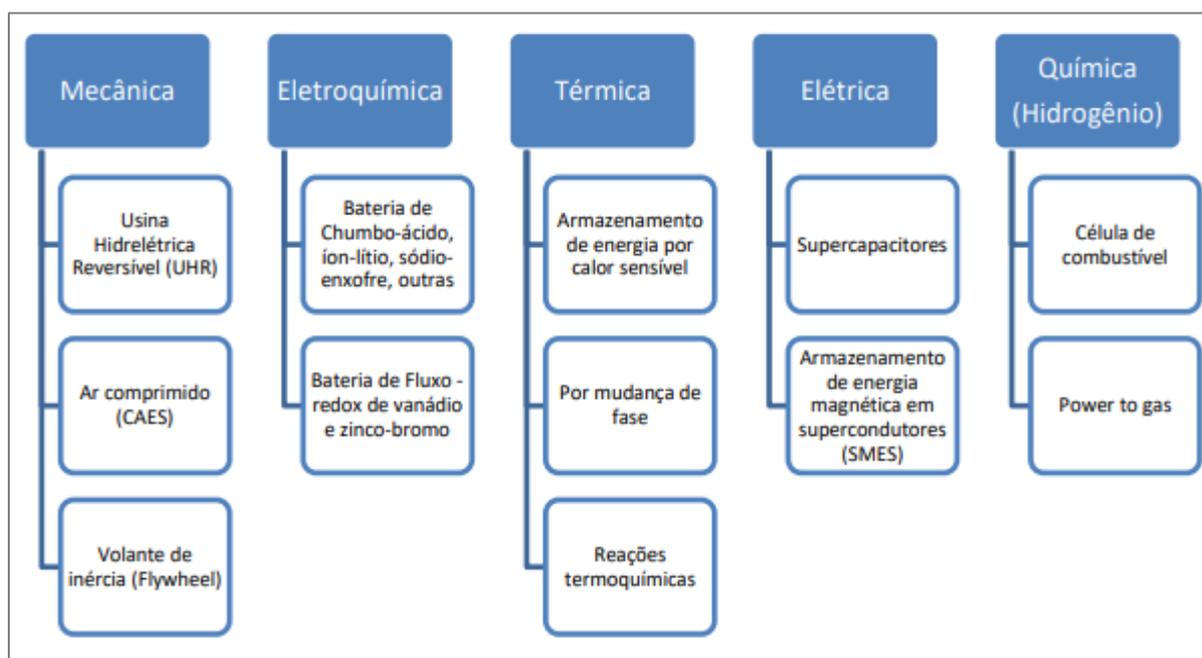
Segundo Canales et Al (2014), a usina elevatória do Vigário está localizada no reservatório de Santana, no estado do Rio de Janeiro e eleva as águas em quase 36 m até o reservatório de Vigário. Ainda segundo os autores, a usina viabiliza a transposição de parte das águas do rio Paraíba do Sul para a Bacia do Rio Guandu, garantindo o abastecimento de água para a região metropolitana do Rio de Janeiro.

A Usina Edgard de Souza, localizada no rio Tietê, no estado de São Paulo, foi inicialmente inaugurada em 1901 e em 1954 a casa de força foi substituída por uma estação de recalque com unidades reversíveis (Canales et Al, 2014). A Usina foi desativada em 1984.

### 2.4.5 Alternativas para o armazenamento de energia

Visto que mais de 94% do armazenamento de energia mundial é feito por Usinas Hidrelétricas Reversíveis, os 5% restantes são armazenadas por outras tecnologias, sendo elas térmicas, eletromecânicas e eletroquímicas. A Figura 10 apresenta as principais tecnologias de armazenamento de energia.

Figura 10 – Armazenamento de energia: principais tecnologias



Fonte: Adaptado de MassCEC & DOER (2016 apud EPE, 2019)

Em 2021 o IFPSH comparou, no jornal “*Capabilities, Costs and Innovation Working Group*”, além dos custos de tecnologias de armazenamento de energia, métricas de performance como o tempo de vida de UHR, baterias, ar comprimido e células de combustível. No Tabela 3 pode-se observar a comparação dos custos totais e tempos de vida.

Tabela 3 - Comparação de tecnologias para armazenamento de energia por 1.000/100 MW e 4 horas de duração

	<b>UHR</b>	<b>Bateria de Lítio</b>	<b>Ar Comprimido</b>	<b>Células de combustível</b>
<b>Tempo de vida (anos)</b>	40	10	30	30
<b>CAPEX 2020 (USD/kW)</b>	2.710,00	4.570,00	3.340,00	8.900,00
<b>CAPEX 2030 (USD/kW)</b>	2.710,00	3.210,00	3.340,00	4.620,00

Fonte: Adaptado de IFPSH (2021)

As Usinas Hidrelétricas Reversíveis apresentam baixo custo, alta capacidade de armazenamento de energia e o maior tempo de vida quando comparadas com as demais tecnologias de armazenamento de energia, no entanto, dentre as desvantagens estão a necessidade da construção de um empreendimento de médio a grande porte e o represamento de água (LIMA et al., 2021).

## 2.5 IMPACTOS AMBIENTAIS NA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

A preocupação em relação a conservação do meio socioambiental frente aos grandes projetos de engenharia é recente e teve como marco a Política Nacional do Meio Ambiente - PNMA, promulgada pela Lei Federal 6.938, de 31 de agosto de 1981 (Colito, 2000 apud CARVALHO et al., 2018). A Lei dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, e tem como um dos seus objetivos a compatibilização do desenvolvimento econômico e social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico (BRASIL, 1981).

Em 1986, o Conselho Nacional do Meio Ambiental – CONAMA, em sua Resolução 001, introduz e considera, em seu artigo primeiro, impacto ambiental como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam os meios físico, biótico e socioeconômico.

Ainda segundo a Resolução CONAMA 001/86, o licenciamento de obras hidráulicas para exploração de recursos hídricos, como usinas hidrelétricas com potência maior que 10

MW, depende da elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA).

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) consiste em um procedimento administrativo de análise prévia dos possíveis impactos ambientais de uma obra, atividade ou empreendimento (CAMPOS & SILVA, 2012), e deve “definir os limites da área geográfica a ser direta ou indiretamente afetada pelos impactos, denominada área de influência do projeto, considerando, em todos os casos, a bacia hidrográfica na qual se localiza”, conforme o Artigo 5º, Inciso III da Resolução 001/86-CONAMA (SOUZA, 2000).

Já Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, prevê que a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar os usos múltiplos das águas, de forma descentralizada e participativa, devendo contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades (MOURA & SILVA, 2017).

A PNRH elenca em seu artigo terceiro as diretrizes gerais de ação para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, dentre elas, destaca-se a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País.

Apesar de ser considerada, por muitos, como uma energia ‘limpa’, Serra e Oliveira (2020) apontam que estudos mostram que os custos ambientais e sociais da implantação de aproveitamento hidrelétricos são consideravelmente altos e apesar da eficiência energética, esse sistema está longe de gerar uma energia socioambientalmente responsável.

Segundo Borges e Silva (2012), muitos impactos resultantes de usinas, que contribuíram para a eficiência energética, tomam um espaço anterior e descaracterizam, em grande parte, atividades geradoras de substancial contribuição econômica, além dos impactos ecológicos e irreversíveis, não apenas na área de influência direta. Os autores complementam que o principal impacto de hidrelétricas costuma ser o alagamento de importantes áreas e o desaparecimento do habitat de animais.

Além disso, a construção de barragens para geração de energia tem sido considerada, por especialistas, como uma das maiores causadoras de impactos sobre a ictiofauna continental e os impactos sociais adversos são, também, consequências sérias dos represamentos, tais como o deslocamento forçado da população devido à construção de represas (CAMPOS & SILVA, 2012).

Outra alteração importante envolve a supressão da vegetação ciliar, que segundo Serra e Oliveira (2020), além de funcionar como um filtro para a entrada de sedimentos provenientes

do escoamento superficial para os corpos d'água, fornece também alimento alóctone para a biota aquática.

Silva et al. (2016, apud REX et al. 2018) destaca também as áreas de empréstimos, locais utilizados para a remoção de solo e descarte de materiais diversos, necessárias para a construção de usinas, como importantes causadoras de impactos ambientais.

Carvalho (2015) e Bermann (2007, apud Serra e Oliveira ,2020) apontam os principais problemas causados por hidrelétricas, sendo eles:

- Alteração do regime hidrológico;
- Alteração da qualidade das águas;
- Assoreamento dos reservatórios;
- Problemas de saúde pública;
- Alteração no uso da água;
- Sismos induzidos;
- Alteração na dinâmica do ambiente aquático;
- Alteração na temperatura dos rios;
- Eutrofização dos reservatórios;
- Efeito barreira;
- Desenvolvimento local e regional;
- Aprimoramento do conhecimento científico.

Frente aos impactos identificados, os Estudos de Impacto Ambiental devem avaliar as melhores alternativas locais na fase de projeto, além de estabelecer programas e medidas ambientais que devem ser adotados para minimizar, mitigar, controlar ou compensar tais modificações negativas e potencializar as positivas (SÁNCHEZ, 2006; INEA, 2008 apud CARVALHO et al, 2018). Sendo assim, a gestão ambiental deve começar nas fases iniciais do projeto, passando pela etapa de construção e continuar ao longo da vida útil da usina (SOUZA, 2000).

### **2.5.1 Abordagem da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em UHR**

O "desenvolvimento sustentável" é alcançado quando um produto ou sistema selecionado tem o mínimo impacto ambiental em comparação com outros (Nitkiewicz & Sekret, 2014 apud Alqud, 2017) e para comparar qual produto, ou sistema, tem o menor impacto

ambiental ao longo de seu ciclo de vida é realizada a avaliação do ciclo de vida (ALQUB, 2017).

O ciclo de vida é uma abordagem sistêmica que permite avaliar o desempenho ambiental através do ciclo de vida de um sistema ou produto. Essa abordagem afirma que o impacto ambiental tem um escopo mais amplo do que estar apenas relacionado a um único local ou serviço, mas sim ocorre ao longo de todo o ciclo de vida de produtos e serviços (TORRES, 2011).

Segundo a Norma NBR ISO 140400: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura, a ACV pode ajudar:

- na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em vários pontos de seu ciclo de vida;
- na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não-governamentais (por exemplo, planejamento estratégico, definição de prioridades, projeto ou reprojeção de produtos ou processos);
- na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição;
- no marketing (por exemplo, uma declaração ambiental, um programa de rotulagem ecológica ou uma declaração ambiental de produto).

Ainda segundo a ISO14040, há quatro fases em um estudo da ACV: (a) definição de metas e escopo; (b) análise de inventário; (c) avaliação de impacto; (d) interpretação.

- Definição de metas e escopo: a meta e o escopo determinam o processo de condução da ACV e seu resultado (ALQUB, 2017). Em particular, deve ser dada especial atenção às características operacionais do sistema analisado e seus limites, envolvendo todas as etapas do ciclo de vida (ALBUQ, 2017; IFPSH, 2021)
- Análise de inventário: Os dados, no que diz respeito ao consumo de materiais e energéticos, emissões no ar, água e solos, produção de carbono e subprodutos que estão dentro dos limites do sistema precisam ser coletados (IFPSH, 2021).
- Avaliação de impacto: As categorias comuns de impacto ambiental consideradas na ACV incluem: mudança climática, ozônio, material

particulado, formação fotoquímica de ozônio, acidificação, eutrofização, esgotamento de recursos, toxicidade humana, etc (IFPSH, 2021)..

- Interpretação: Esta etapa apresenta a constatação completa da avaliação do impacto, sendo o resultado adequado com a meta e o escopo do estudo, fornecendo um esclarecimento dos limites do padrão e algumas recomendações para estudos posteriores (ALQUB, 2017).

Atualmente a aplicação da ACV à tecnologia e projetos de UHR está principalmente no domínio da pesquisa, e ainda não aplicada em uma base industrial de tomada de decisões (IFPSH, 2021).

No entanto, o grupo de trabalho de sustentabilidade da IFPSH publicou em setembro de 2021 o “Trabalho sobre sustentabilidade de Usinas Hidrelétricas Reversíveis”, documento que, a partir de revisão bibliográfica, mostra os principais parâmetros que influenciam a avaliação do ciclo de vida de uma UHR, sendo eles:

- a mistura de eletricidade usada para bombear;
- o equilíbrio de geração e eficiência de bombeamento, sendo que em UHRs de circuito aberto a entrada adicional de água dos afluentes no reservatório superior pode ser considerada como um aprimoramento da eficiência;
- as hipóteses operacionais, principalmente a quantidade total de energia fornecida pela instalação de armazenamento ao longo de sua vida útil.

Torres (2011) pontua, assim como IFPSH (2021), que o tipo de eletricidade (renovável ou não) empregada para o bombeamento é determinante para a avaliação dos impactos ambientais. Dentre os principais resultados da abordagem do ciclo de vida obtidos por Torres (2011), Alqub (2018) e IFPSH (2021), estão:

- A ACV não pode ser usada como ferramentas única para avaliar o desempenho ambiental de uma tecnologia de armazenamento de energia;
- A ACV não considera alguns aspectos de impacto ambiental que devem ser cobertos pela metodologia global do EIA específica para empreendimentos hidrelétricos (por exemplo, impactos na população de peixes);
- Pelo menos 70% dos impactos avaliados pela ACV foram observados na fase de construção da UHRs

- Os principais impactos ambientais observados na ACV estão associados ao uso de metais para a construção de túneis e da turbina reversível e à fase de escavação e transporte de materiais;
- As emissões de gases de efeito estufa dos reservatórios de um projeto de UHR devem ser semelhantes à UHE e devem ser utilizados os mesmos critérios/ferramentas.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho buscou, a partir da revisão da literatura, analisar os principais impactos ambientais causados pela construção e operação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil, além de identificar as oportunidades e desafios desse tipo de empreendimento.

A revisão da literatura é fundamental para a investigação, que envolve localizar, analisar, sintetizar e interpretar a investigação prévia relacionada com a sua área de estudo, é, então, uma análise bibliográfica pormenorizada, referente aos trabalhos já publicados sobre o tema (BENTO, 2012).

Segundo Echer (2001), a estratégia para a busca da revisão da literatura é a sistematização referente a: (1) conhecer o sistema de registro e catalogação das bibliotecas; (2) identificar a palavra-chave do tema de pesquisa; (3) iniciar a busca; (4) localizar e organizar o material bibliográfico; (5) escrever o texto. Segundo Goldim, (1997 apud ECHER, 2001), um bom texto é fruto do processo de criação e recriação.

Primeiramente, buscou-se banco de dados para a aquisição da informação. Em seguida, foram consultados e selecionados os estudos, permitindo a obtenção dos dados necessários para o estudo.

A análise de impactos ambientais, positivos e negativos, de UHRs no Brasil deu-se a partir da comparação entre impactos observados em UHEs no Brasil e UHRs existentes em outros países do mundo. A análise foi realizada com o auxílio de ferramentas de análise de *software* Excel.

### 3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS PARA A ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

#### 3.1.1 Consulta em Banco de Dados

As informações podem provir de observações, de reflexões pessoais, de pessoas que adquiriram experiências pelo estudo ou pela participação em eventos, ou ainda do acervo de conhecimentos reunidos em bibliotecas, centros de documentação bibliográfica ou de qualquer registro que contenha dados (PEREIRA, 2014).

Com o intuito de obter informações, buscou-se documentos como artigos científicos, livros, teses e normas, em base de dados científicos (Google Acadêmico, *ScienceDirect* e *ResearchGate*). Também foram consultados banco de dados que contém estudos de impacto ambiental de grandes aproveitamentos hidrelétricos do Brasil, Espanha, Portugal e Estados Unidos. Os acervos de entidades governamentais do consultados estão expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Acervos de entidades governamentais consultados

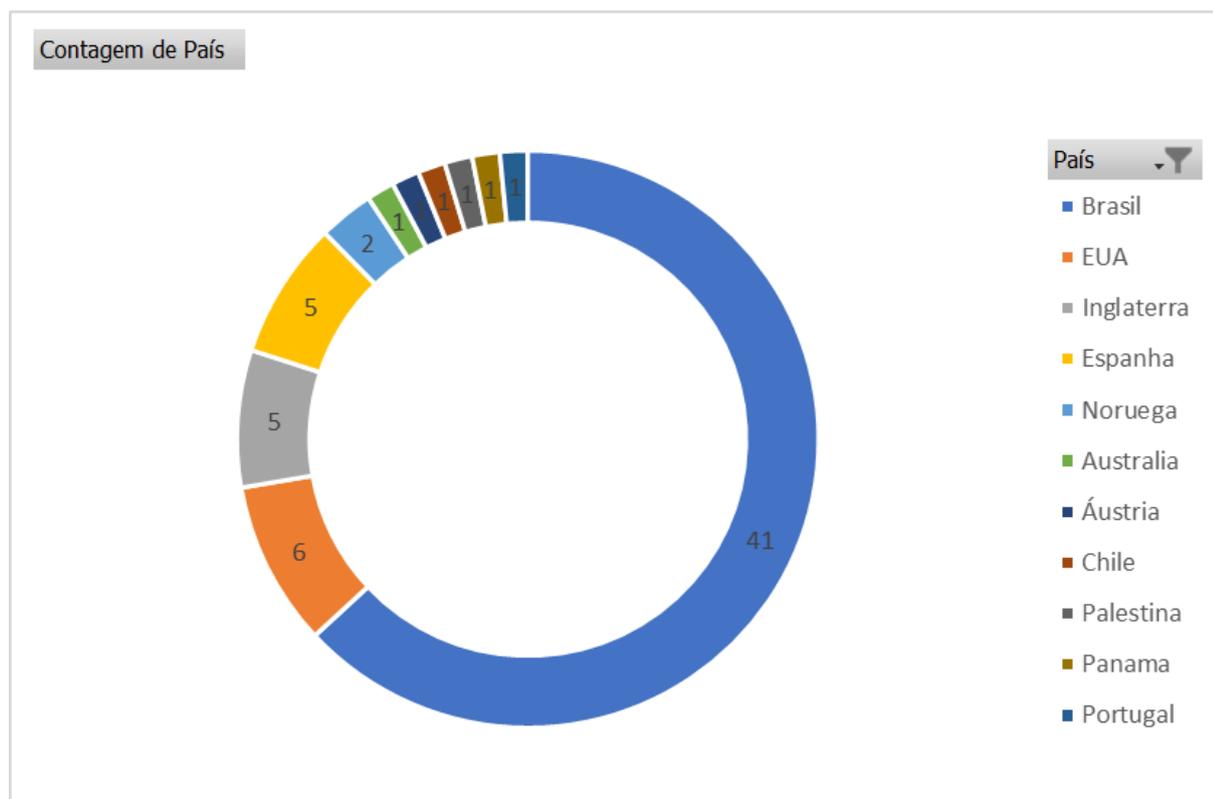
<b>País</b>	<b>Órgão</b>	<b>Local para consulta</b>
<b>Brasil</b>	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA)	<a href="http://licenciamento.ibama.gov.br/Hidreletricas/">http://licenciamento.ibama.gov.br/Hidreletricas/</a>
<b>Espanha</b>	Ministério para a Transição Ecológica e o Desafio Demográfico (MITECO)	<a href="https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/evaluacion-ambiental/">https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/evaluacion-ambiental/</a>
<b>Portugal</b>	Agência Portuguesa do Ambiente (APA)	<a href="https://siaia.apambiente.pt/">https://siaia.apambiente.pt/</a>
<b>Estados Unidos da América (EUA)</b>	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA)	<a href="https://cdxapps.epa.gov/cdx-enepa-II/public/action/eis/search">https://cdxapps.epa.gov/cdx-enepa-II/public/action/eis/search</a>

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

### 3.1.2 Seleção de documentos

A partir da busca nas bases de dados científicos e bancos de dados de entidades governamentais, foram selecionados, no total, 65 referências bibliográficas, de 11 diferentes países. Observou-se a predominância de referências brasileiras (41) seguida por dos Estados Unidos (6), Inglaterra (5) e Espanha (5), como observado na Figura 11.

Figura 11 – Referências por país



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Dentre os documentos selecionados, estão Avaliações de Impacto Ambiental de oito empreendimentos hidrelétricos. Na Figura 12, elaborada no *software* de georreferenciamento QGIS, pode-se observar a distribuição geográfica das hidrelétricas selecionadas.

Figura 12 – Localização dos estudos selecionados



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Dentre as avaliações, foram selecionados Estudos de Impacto Ambiental (EIA) de quatro UHEs brasileiras, elencados na Tabela 5.

Tabela 5 - UHEs selecionadas

<b>País</b>	<b>Estado</b>	<b>UHE</b>
Brasil	RJ	Funil
Brasil	SC	Barra Grande
Brasil	MG	Porto Colômbia
Brasil	MT	Teles Pires

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Os estudos de Usinas Hidrelétricas Reversíveis selecionados são de empreendimentos distribuídos entre Espanha, Estados Unidos e Portugal, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - UHRs selecionadas

<b>País</b>	<b>UHR</b>
Espanha	Talavera
Espanha	Santa Cristina
Portugal / Espanha	Salas Concha
EUA	Swan Lake North

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Os documentos serviram de base para a revisão da literatura, sendo que os oito estudos de impacto ambiental apontados nas tabelas anteriormente citadas foram utilizados para a extração de dados de Impacto Ambiental de UHEs e UHRs para a análise preditiva de impactos ambientais de UHRs no Brasil.

### 3.1.3 Organização e apresentação dos dados extraídos

Os dados extraídos dos estudos de avaliação de impacto ambiental foram organizados e, devido à grande variação na forma de apresentação e denominação, foram padronizados para permitir a manipulação e comparação. Enquanto os estudos brasileiros, por exemplo, possuem listas ou matrizes, que facilitam a identificação dos impactos, o estudo norte americano declara os impactos apenas na forma descritiva, ou seja, os efeitos ambientais das atividades estão inseridos ao longo do texto.

Os dados de impactos ambientais, decorrentes da construção e operação de cada uma das usinas, foram coletados e organizados em planilhas, em arquivo *Excel*. Os impactos ambientais de empreendimentos brasileiros devem ser classificados, de acordo com o artigo sexto da Resolução CONAMA n 001/86:

II - Análise dos impactos ambientais do projeto e de suas alternativas, através de identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes, discriminando: os impactos positivos e negativos (benéficos e adversos), diretos e indiretos, imediatos e a médio e longo prazos, temporários e permanentes; seu grau de reversibilidade. suas propriedades cumulativas e sinérgicas; a distribuição dos ônus e benefícios sociais.

Os impactos ambientais, positivos e negativos, mais comuns observados em EIAs de UHEs brasileiras foram:

- Alteração do regime hidrológico;
- Alteração da Estrutura Populacional da Ictiofauna;
- Alteração na qualidade das águas;
- Fragmentação e perda de habitats naturais;
- Supressão/Alteração da vegetação;
- Geração de emprego e Renda;
- Dinamização da economia.

No que tange os impactos dos estudos das UHR Talavera, Santa Cristina e Salas Concha, a caracterização é dada de acordo com o Real Decreto 1.131, de 30 de setembro de 1988. O decreto redige que:

Os efeitos positivos e negativos devem ser distinguidos; o temporário do permanente; o simples do cumulativo e sinérgico; direto da indireta; reversível de irreversível; o recuperável do irrecuperável; os jornais daqueles de aparência irregular; os contínuos do descontínuo. Serão indicados os impactos ambientais compatíveis, moderados, graves e críticos que estão previstos em decorrência da execução do projeto.

Ainda segundo o Real Decreto espanhol, a magnitude dos impactos ambientais pode ser classificada como:

- Compatível: impacto cuja recuperação é imediata após a cessação da atividade, e não requer práticas protetoras ou corretivas;
- Moderado: a recuperação não requer práticas intensivas de proteção ou corretivo, e na qual a realização das condições ambientais iniciais requer algum tempo.
- Severo: impacto que recuperação das condições do meio ambiente requer a adaptação de medidas protetivas ou corretiva;
- Crítico: impacto cuja magnitude é maior que o limiar aceitável.

Nos Estados Unidos, a Lei Nacional de Política Ambiental (NEPA), de 1969, foi criada para garantir que os órgãos federais considerem os impactos ambientais de suas ações e decisões. A Lei propõe:

Declarar uma política nacional que estimule a harmonia produtiva e agradável entre o homem e seu meio ambiente; promover esforços que previnam ou eliminem danos ao meio ambiente e à biosfera e estimulem a saúde e o bem-estar do homem; para enriquecer a compreensão dos sistemas ecológicos e recursos naturais importantes para a Nação; e estabelecer um Conselho de Qualidade Ambiental.

Os impactos ambientais, positivos e negativos, mais comuns observados em avaliações de impacto ambiental da UHRs consultadas foram:

- Fragmentação e perda de habitats naturais;
- Perda de áreas produtivas;
- Aleração dos Níveis de Pressão Sonora e Vibração;
- Alteração do regime hidrológico;
- Alteração da paisagem local;
- Supressão/Alteração da vegetação;
- Geração de emprego e Renda.

Advindos de diferentes empreendimentos, em distintos países e regiões, os estudos de impacto ambiental apresentaram grande divergência no que concerne a metodologia de avaliação.

O cruzamento de dados entre impactos ambientais de UHEs no Brasil e UHRs em outros países resultaram na análise quantitativa dos impactos ambientais da construção e operação das UHRs no Brasil. Para a análise qualitativa dos impactos, avaliou-se, além dos dados de impacto extraídos dos estudos de avaliação ambiental, as demais literaturas consultadas.

### 3.1.4 Soluções tecnológicas

Para a sistematização e análise da informação, utilizou-se a Tabela Dinâmica, ferramenta do software *Excel*, utilizada para calcular, resumir e analisar dados (Figura 13).

Figura 13 – Solução tecnológica: Tabela dinâmica



Fonte: *Microsoft Excel* (2022)

Os resultados gráficos também foram obtidos a partir do arquivo *Excel*, para isso a ferramenta de análise de Tabela Dinâmica, Gráfico Dinâmico, foi utilizada (Figura 14).

Figura 14– Solução tecnológica: Gráfico dinâmico



Fonte: *Microsoft Excel* (2022)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

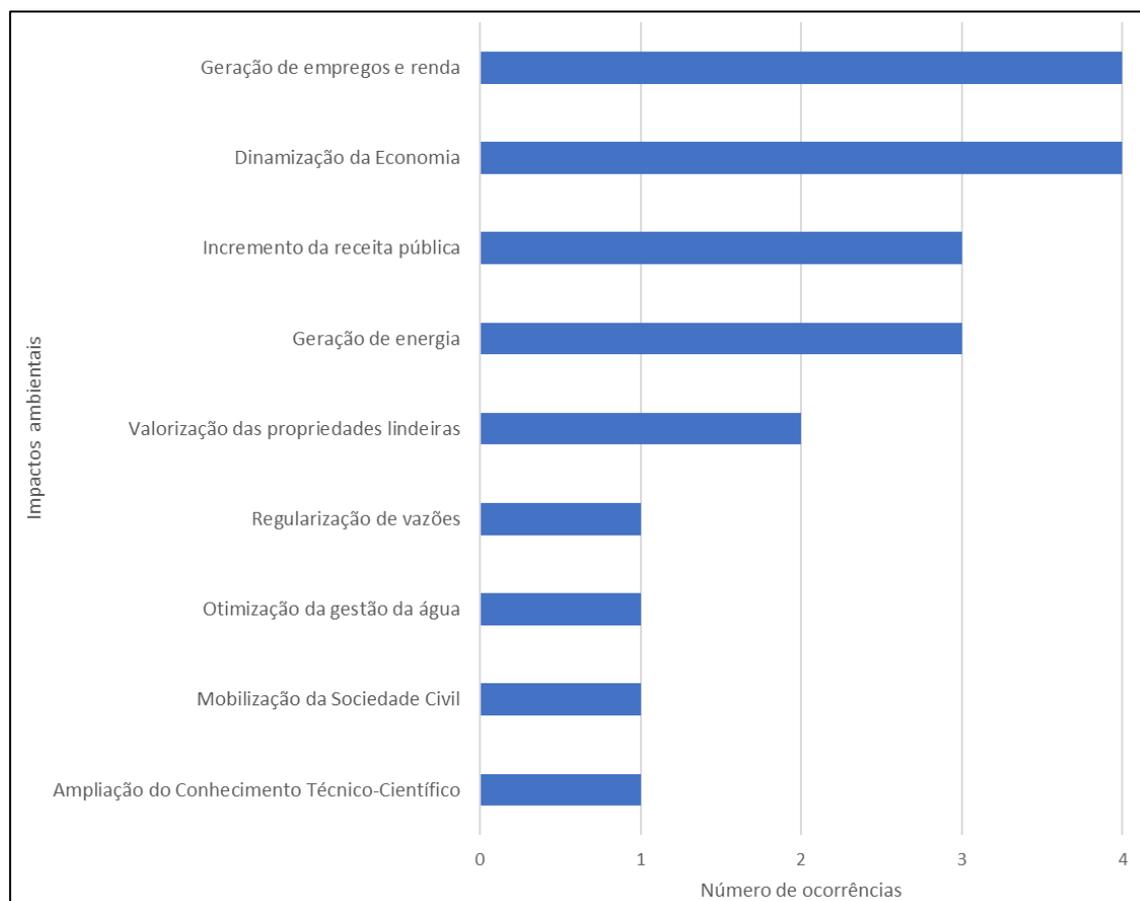
#### 4.1.1 IMPACTOS AMBIENTAIS POSITIVOS

A análise quantitativa dos estudos de impacto ambiental das quatro UHEs brasileiras selecionadas (Funil, Barra Grande, Porto Colômbia e Teles Pires) permitiu identificar nove diferentes impactos ambientais positivos que podem decorrer da implantação e funcionamento desse tipo de empreendimento.

A geração de emprego e renda e a dinamização da economia foram os impactos positivos observados em 100% dos estudos avaliados. A regularização das vazões, otimização da gestão da água, mobilização da sociedade civil e ampliação do conhecimento técnico-científico foram os menos corriqueiros, sendo identificados em apenas 1 dos 4 EIAs.

Os impactos positivos observados e o número de ocorrências estão expostos no Figura 15.

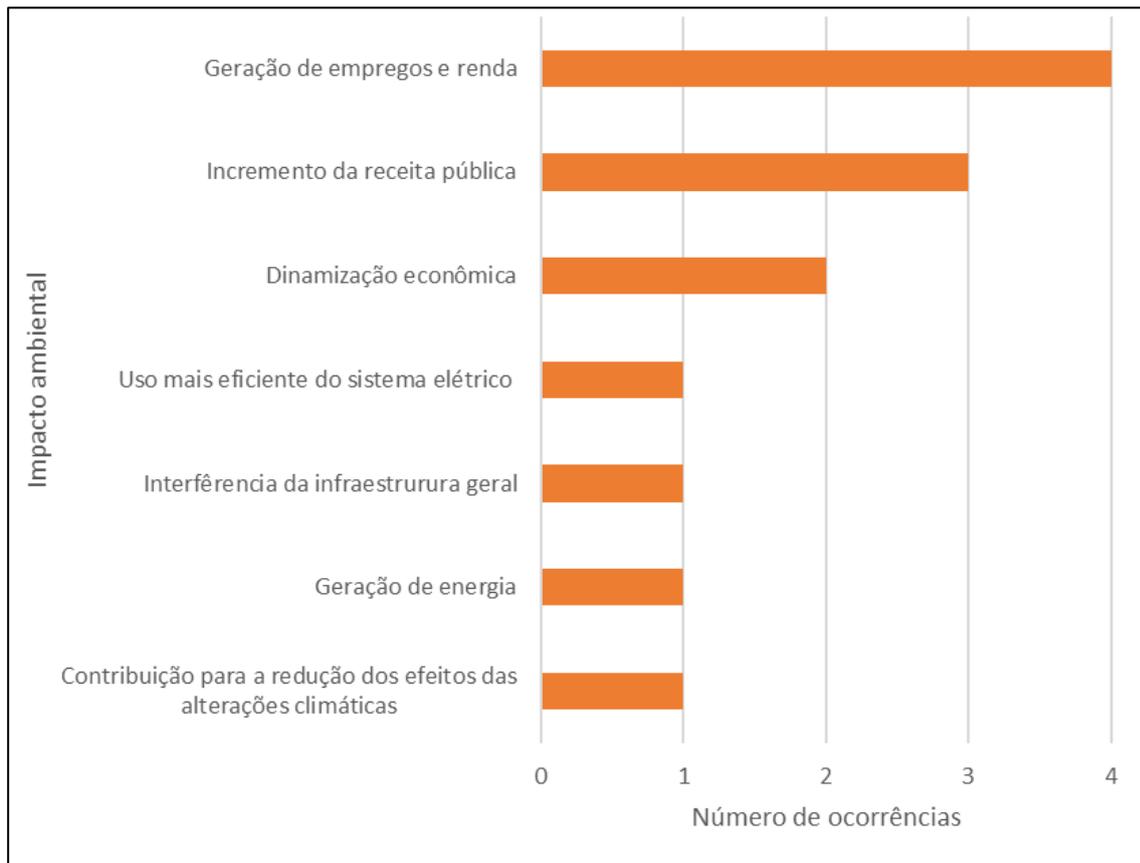
Figura 15 - Impactos Ambientais Positivos UHEs



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Já os estudos de impacto ambiental das quatro UHRs (Salas Concha, Talavera, Santa Cristina e *Swan Lake North*) permitiram identificar sete impactos ambientais positivos distintos. A geração de emprego e renda, assim como nos estudos das UHEs, foi identificado como impacto positivo em 100% dos estudos avaliados. Os impactos positivos observados e o número de ocorrências estão expostos no Figura 16 –.

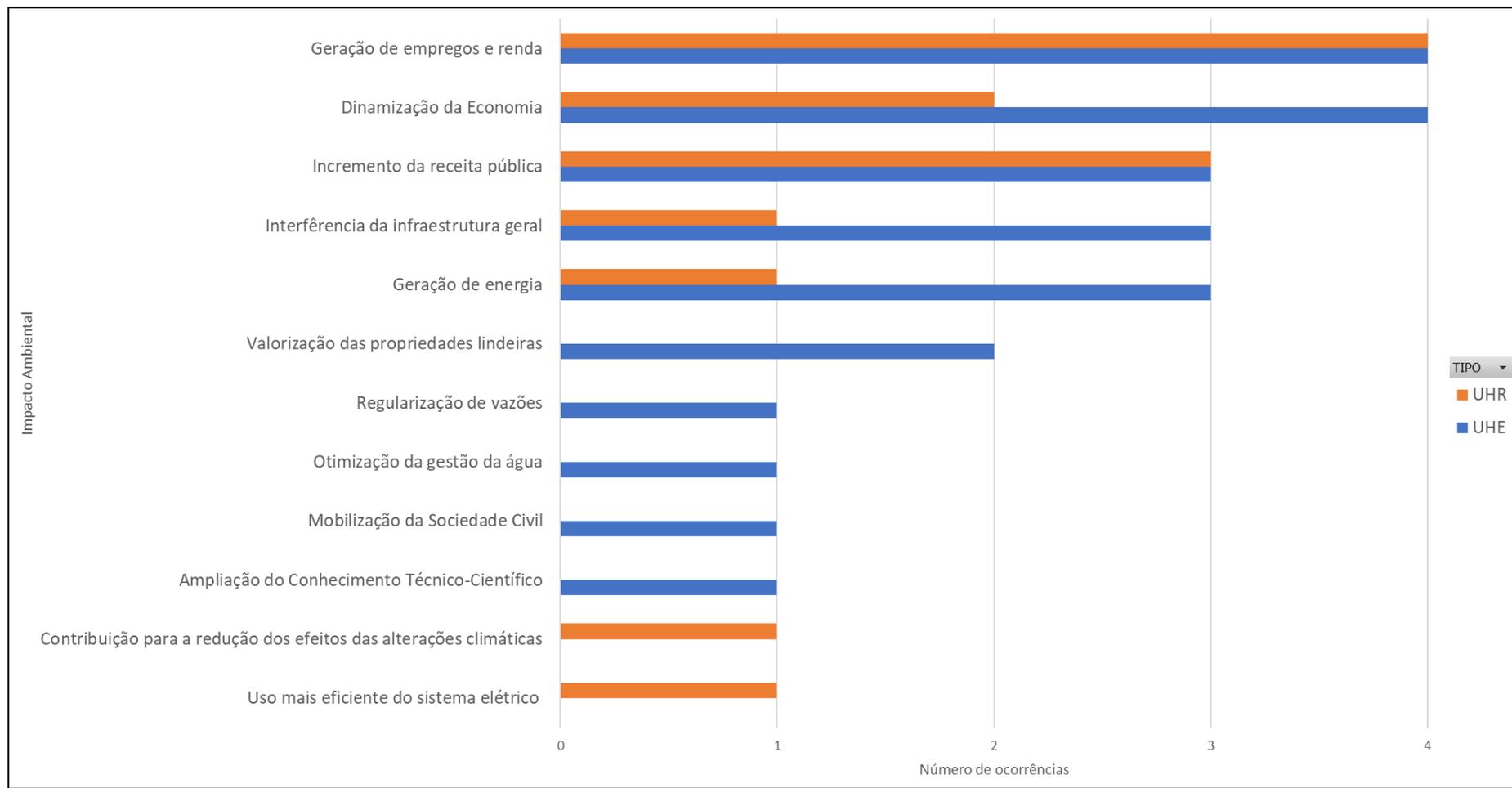
Figura 16 – Impactos Ambientais Positivos UHRs



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

O cruzamento de dados de impactos ambientais positivos de UHEs e UHRs permitiram avaliar, no total, 12 dados de impacto ambiental de natureza positiva. Desse total, cinco efeitos foram apontados em ambos os tipos de empreendimento hidrelétrico, cinco apenas em UHEs e dois apenas em UHRs, como pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Impactos Ambientais Positivos: UHEs e UHRs



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Os impactos ambientais positivos identificados apenas em estudos ambientais de Usinas Hidrelétricas Reversíveis foram:

- Contribuição para a redução dos efeitos das alterações climáticas;
- Uso mais eficiente do sistema elétrico.

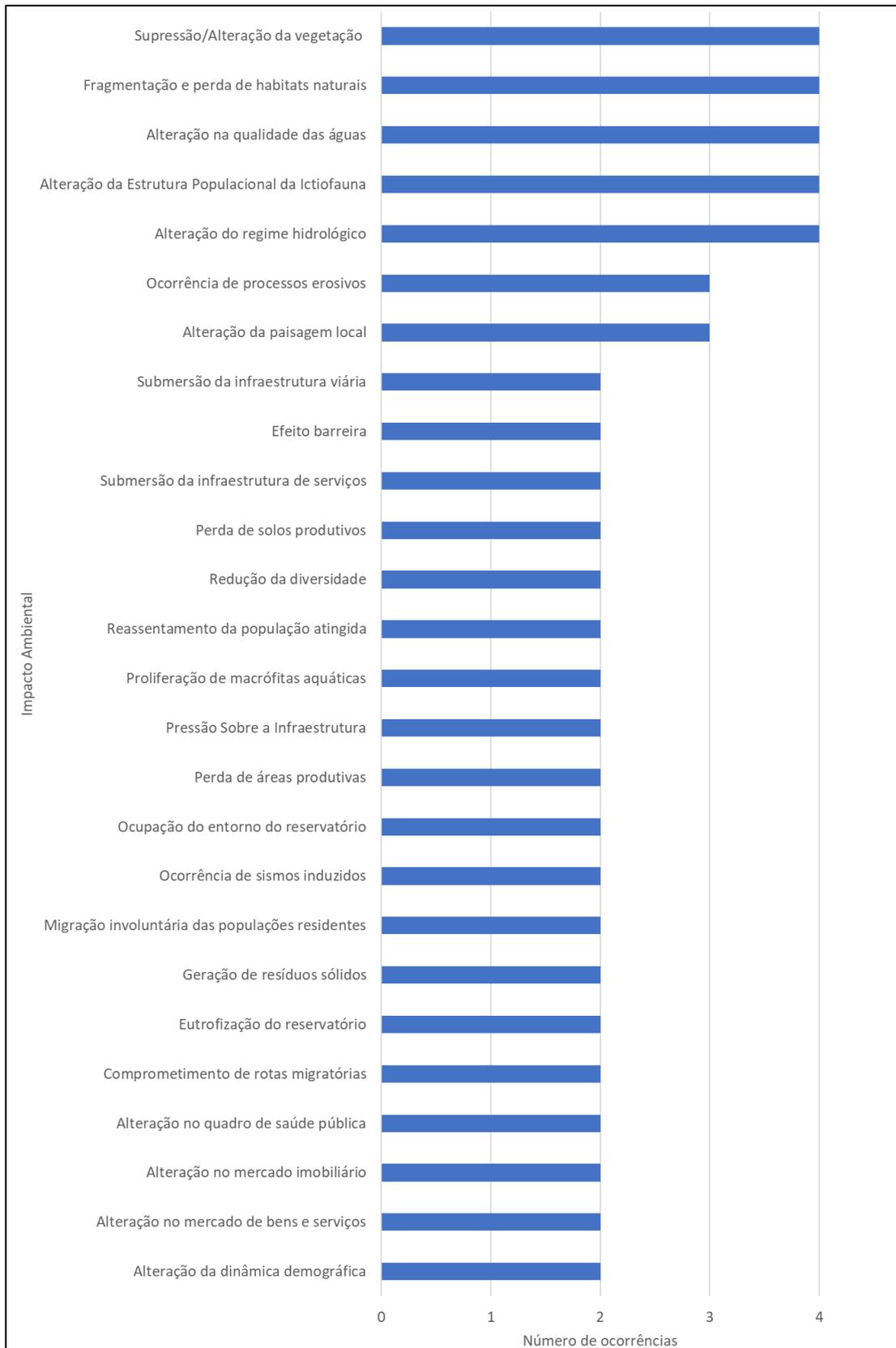
#### **4.1.2IMPACTOS AMBIENTAIS NEGATIVOS**

Assim como no item 4.1.1, a análise quantitativa dos estudos de impacto ambiental das quatro UHEs brasileiras permitiu identificar diferentes impactos ambientais negativos (49) que podem decorrer da implantação e funcionamento desse tipo de empreendimento.

A supressão e/ou alteração da vegetação, fragmentação e perda de habitats naturais, alteração da qualidade das águas superficiais, alteração da estrutura populacional da ictinofauna e alteração do regime hidrológico foram os impactos positivos observados em 100% dos estudos avaliados.

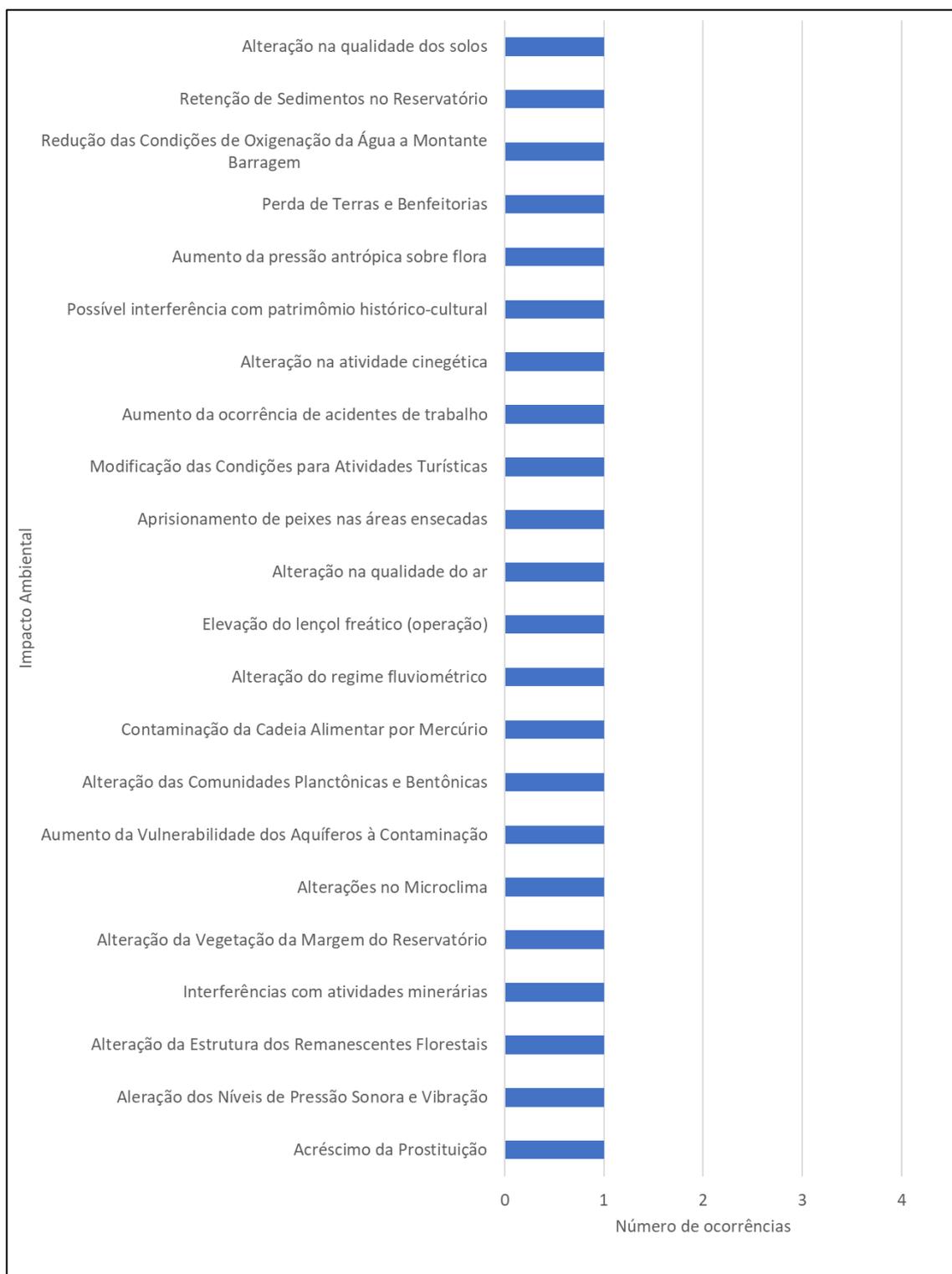
Os impactos negativos, no meio físico, biótico e socioeconômico, observados e o número de ocorrências estão expostos nos gráficos apresentados nas Figura 18 - e Figura 19.

Figura 18 - Impactos Ambientais Negativos UHEs



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 19 - Impactos Ambientais Negativos UHEs (Continuação)



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Os estudos de impacto ambiental das quatro UHRs permitiram identificar 37 impactos negativos distintos. A supressão/alteração da vegetação, a alteração do regime hidrológico e a

fragmentação e perda de habitats naturais, assim como nos estudos das UHEs, foram identificados como impactos negativos em 100% dos estudos avaliados. Além disso, em todos os estudos foram apontados a alteração da paisagem local, a alteração dos níveis de pressão sonora e vibração e a perda de área produtivas. Os impactos observados e o número de ocorrências estão expostos no Figura 20.

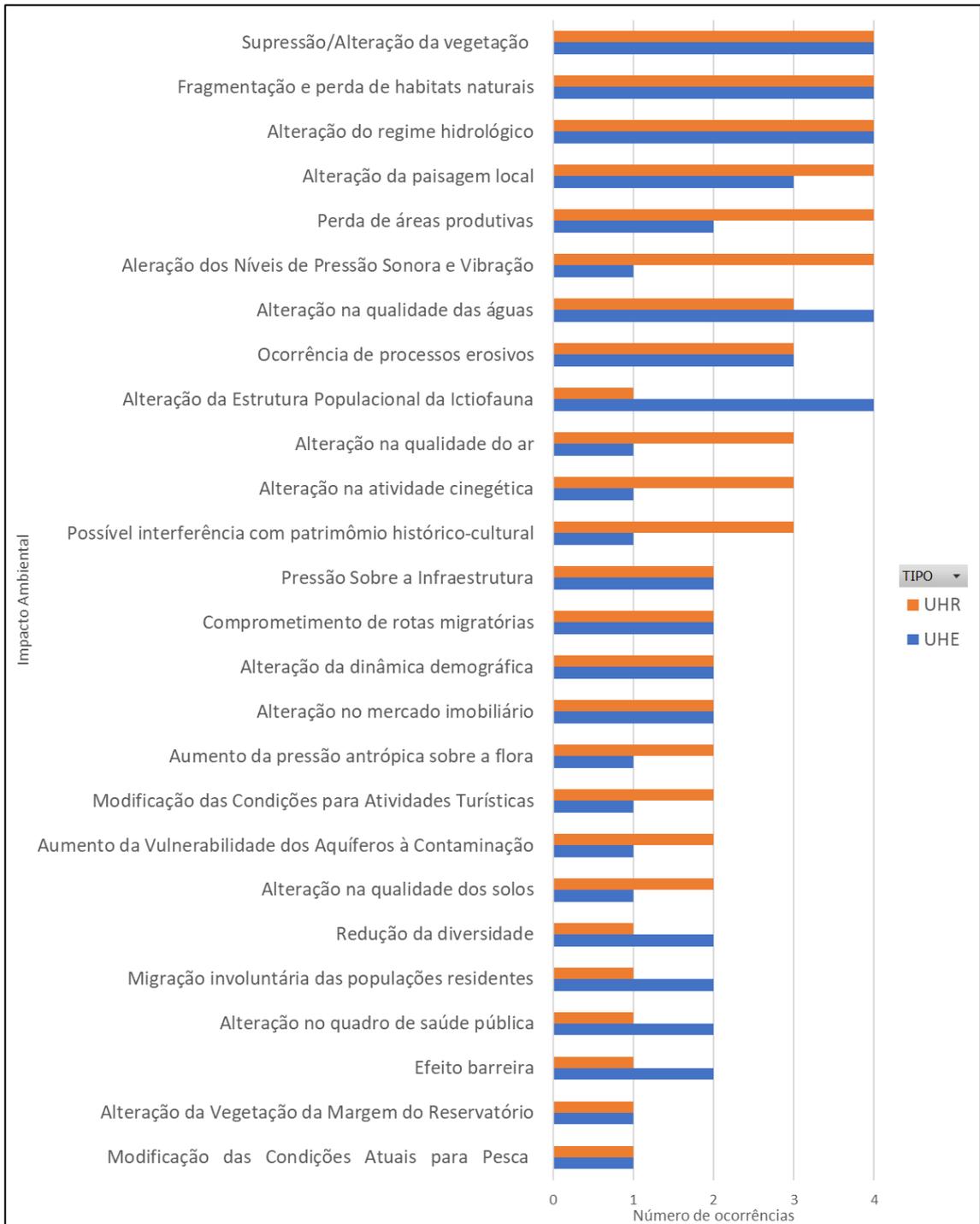
Figura 20- Impactos Ambientais Negativos UHRs



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

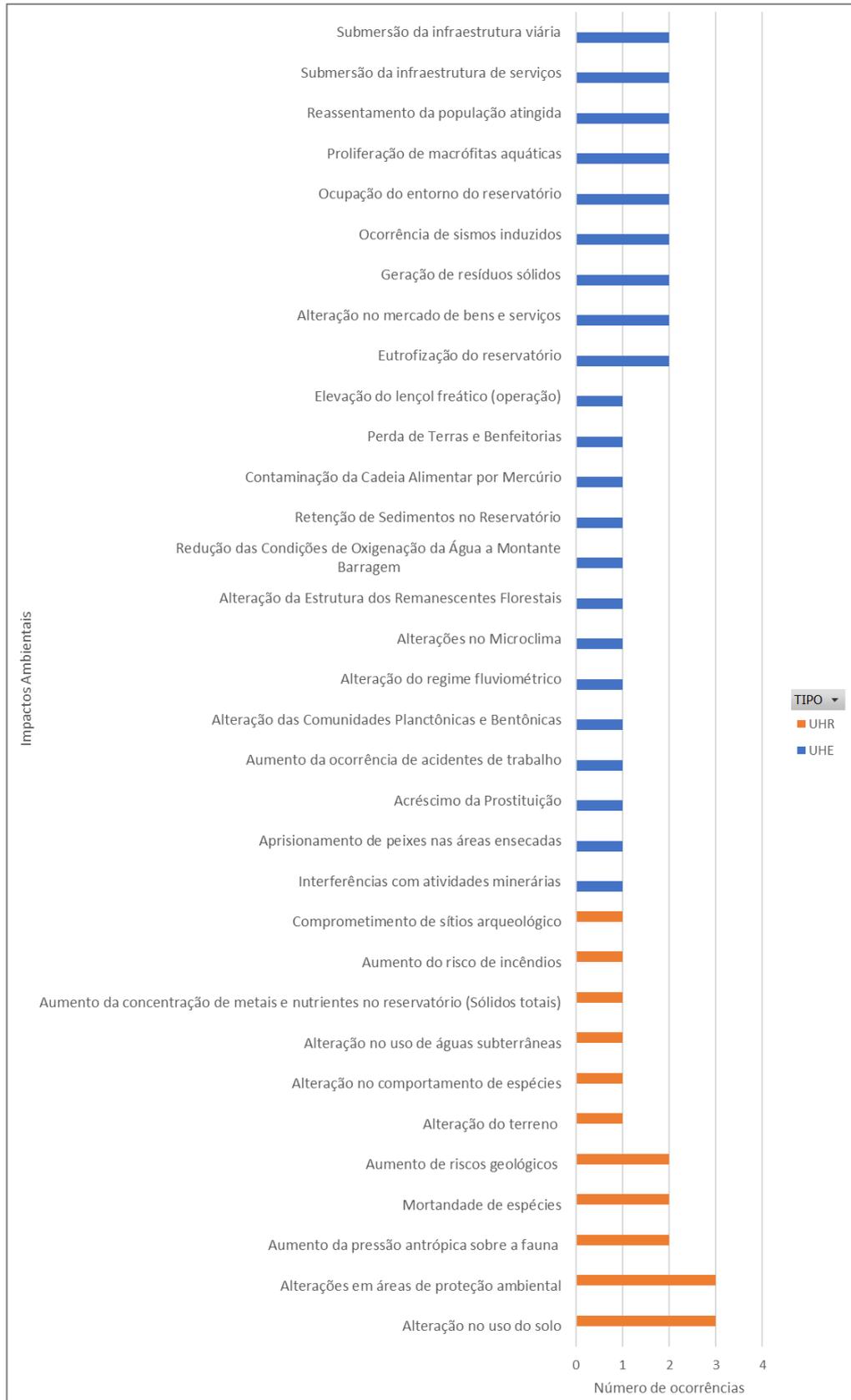
O cruzamento de dados de impactos ambientais positivos de UHEs e UHRs permitiram avaliar, no total, 60 dados de impacto ambiental de natureza negativa. Desse total, 26 efeitos foram apontados em ambos os tipos de empreendimento hidrelétrico, 23 apenas em UHEs e 11 apenas em UHRs, como pode ser observado nas Figura 21 e Figura 22..

Figura 21 - Impactos Ambientais Negativos UHEs e UHRs



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 22 - Impactos Ambientais Negativos UHEs e UHRs (continuação)



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Os impactos ambientais negativo identificados apenas nos estudos ambientais de Usinas Hidrelétricas Reversíveis foram:

- Alterações no uso do solo;
- Alterações em áreas de proteção ambiental;
- Aumento da pressão antrópica sobre a fauna;
- Aumento de riscos geológicos;
- Alterações no declive do terreno;
- Alteração no comportamento de espécies;
- Alterações no uso de águas subterrâneas;
- Aumento do risco de incêndios;
- Aumento da concentração de metais pesados, nutrientes e sólidos totais no reservatório;
- Comprometimento de sítios arqueológicos.

Os impactos elencados anteriormente, obtidos a partir da análise quantitativa dos dados extraídos, ocorrem nas fases de construção e/ou operação das UHRs e afetam os meios físico, biótico e socioeconômico. Dentre esses impactos, destacam-se aqueles que ocorrem devido as características específicas desse tipo de empreendimento:

#### Aumento de riscos geológicos

O aumento de riscos geológicos, como deslizamentos de terra, ocorre, principalmente na fase de construção do empreendimento e é ocasionado pelo grande volume de escavação realizado.

#### Aumento da concentração de metais pesados, nutrientes e sólidos totais no reservatório

Segundo FERC (2019), a transferência de água entre os reservatórios pode acarretar concentrações de sólidos totais, metais pesados e nutrientes mais elevadas em UHRs com circuito fechado (Closed loop). O estudo de impacto ambiental da UHR *Swan Lake North*, nos Estados Unidos, estimou o aumento da concentração de sólidos totais nos reservatórios, apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Acréscimo na concentração de Sólidos totais

Anos	Concentração de sólidos totais (mg/L)		
	Mínima	Média	Máxima
<b>1</b>	76,4	95,1	128,4
<b>10</b>	171,5	213,5	306,0
<b>50</b>	594,2	739,7	998,6

Fonte: FERC (2021)

Ainda segundo o estudo, as concentrações não superariam os 1.000 mg/L, limite utilizado pelo Serviço Geológico dos EUA, no entanto, é um impacto relevante a ser monitorado.

#### Alterações no uso de águas subterrâneas

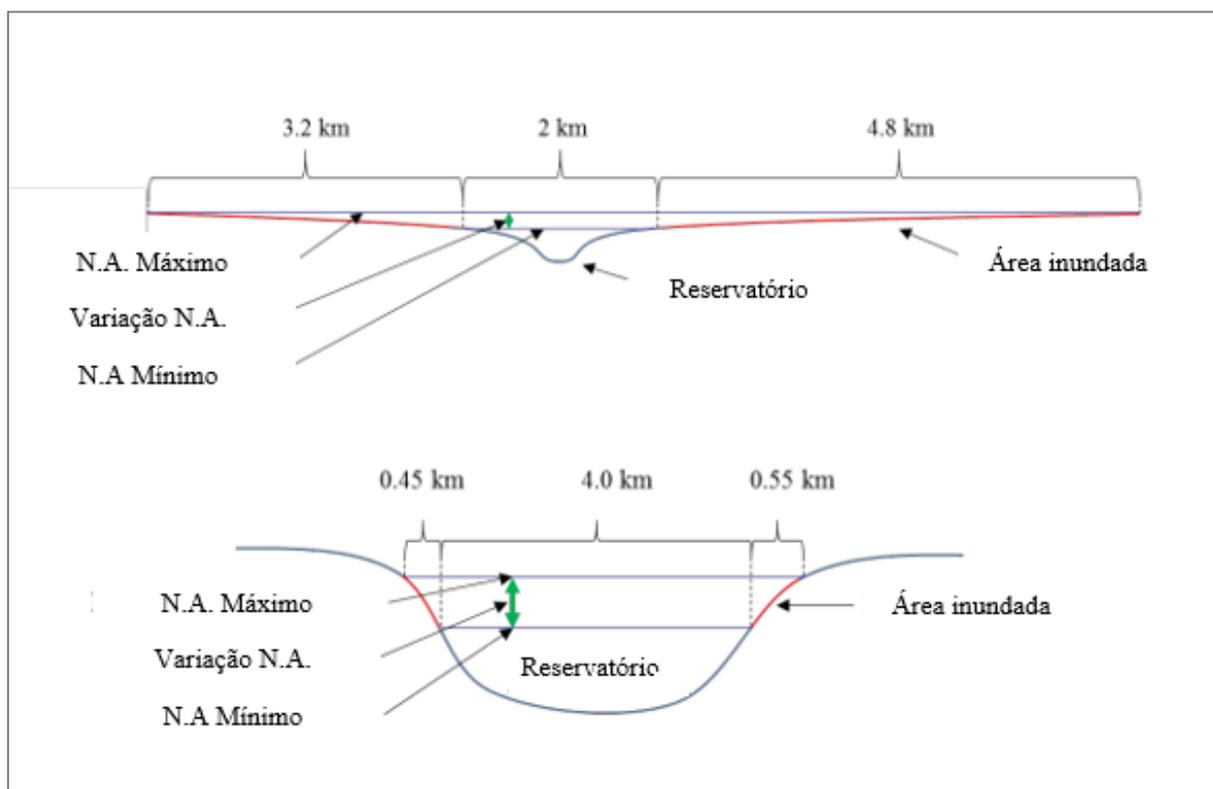
Observou-se que a UHR de circuito fechado Swan Lake North prevê o uso de águas subterrâneas para seu primeiro enchimento e para compensar a água evaporada ao longo da operação da usina. Esse impacto poderá ser identificado em outras UHRs de circuito fechado.

De acordo com SCHERER (2016, apud HUNT et al. 2018), perdas de água por evaporação estão relacionadas com a área alagada e reduzem o volume total armazenado. Para reduzir a evaporação, um reservatório deve ter uma alta relação volume armazenado/área inundada (HUNT, 2018).

Além desses impactos, Patocka (2014) pontua a flutuação do nível d'água como uma causadora de impactos ambientais negativos. Apesar de menores que as observadas e UHEs, as alterações de nível são mais frequentes em UHRs. Dentre os impactos apontados pelo autor, estão as mudanças nos padrões de circulação do fluxo d'água, as mudanças de temperatura na água e as alterações na estabilidade dos taludes dos reservatórios.

Segundo Hunt et al. (2018), a variação do nível do reservatório dependerá da relação volume do armazenado/área inundada. Quanto maior a relação, maior a variação do nível de água (NA), como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 - Variação do Nível de Água (NA) do Reservatório



Fonte: Adaptado de Hunt et al. (2018)

## 4.2 ANÁLISE QUALITATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

### 4.2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS POSITIVOS

Para a análise qualitativa, foram analisados os impactos mais frequentes, definidos a partir da análise quantitativa. A presente análise utilizou a magnitude como parâmetro de comparação. Na Tabela 8 estão expostas as frequências que os efeitos foram classificados com magnitude Pequena, Média e Alta.

Tabela 8 – Análise qualitativa: impactos positivos

<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Magnitude</b>		
	<b>Pequena</b>	<b>Média</b>	<b>Alta</b>
<b>Geração de emprego e Renda</b>	*	****	*
<b>Dinamização da economia</b>	*	**	**
<b>Geração de Energia</b>	-	-	***

**Legenda:**  
 \* magnitude observada em 1 estudo;  
 \*\* magnitude observada em 2 estudos;  
 \*\*\* magnitude observada em 3 estudos;  
 \*\*\*\* magnitude observada em 4 estudos.

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Observa-se que, apesar de mais frequentes em estudos de avaliação de impacto, a geração de emprego e renda e a dinamização da economia tendem a ser um impacto menos relevantes que a Geração de Energia.

Para a análise dos impactos negativos, as magnitudes classificadas pelo Real Decreto 1.131 foram equiparadas à classificação brasileira, como mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Classificação magnitude: Espanha e Brasil

<b>Real Decreto 1.131</b>	<b>Classificação equivalente</b>
<b>Compatível</b>	Pequena
<b>Moderada</b>	Média
<b>Severa</b>	Alta

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A Tabela 10 permite visualizar a análise qualitativa, baseada na magnitude dos impactos negativos observados.

Tabela 10 – Análise qualitativa: impactos negativos

<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Magnitude</b>		
	<b>Pequena</b>	<b>Média</b>	<b>Alta</b>
<b>Alteração do regime hidrológico</b>	**	****	*
<b>Alteração da Estrutura Populacional da Ictiofauna</b>	-	*	****
<b>Alteração na qualidade das águas</b>	*	***	**
<b>Fragmentação e perda de habitats naturais</b>	-	****	***
<b>Supressão/Alteração da vegetação</b>	*	*****	*
<b>Perda de áreas produtivas</b>	**	**	**
<b>Alteração dos Níveis de Pressão Sonora e Vibração</b>	*	***	-
<b>Alteração da paisagem local</b>	*	***	-

**Legenda:**  
\* magnitude observada em 1 estudo;  
\*\* magnitude observada em 2 estudos;  
\*\*\* magnitude observada em 3 estudos;  
\*\*\*\* magnitude observada em 4 estudos;  
\*\*\*\*\* magnitude observada em 5 estudos;

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A Alteração da Estrutura Populacional da Ictiofauna e a Fragmentação e perda de habitats naturais foram os impactos mais preocupantes, no que se refere a magnitude. Ressalta-se que os impactos ambientais de alta magnitude deverão ser alvos de medidas protetivas e/ou corretivas e requerem maior atenção do empreendedor.

A abordagem da Avaliação do Ciclo de Vida em UHR, apresentada no item 2.5.1, pode ser utilizada com uma ferramenta adicional de análise quali-quantitativa dos impactos

ambientais decorrentes da construção e operação de UHRs. Essa abordagem permite a análise dos impactos ambientais a partir de uma visão global, ou seja, de todo o sistema.

Segundo Alqub (2018), os principais impactos ambientais observados em UHRs, a partir da ACV, estão associados ao uso dos metais para a construção de túneis e da turbina reversível e à fase de escavação e transporte. Além disso, a ACV pontua que a sustentabilidade de uma planta reversível dependerá, principalmente, do tipo de energia utilizada no bombeamento (renovável ou não).

#### 4.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM UHRs

Apesar de ainda não aplicada às tecnologias e projetos de UHR em uma base industrial de tomada de decisões (IFPSH, 2021), a revisão da literatura permitiu identificar os principais parâmetros que influenciam a ACV e resultados da utilização dessa abordagem em UHRs (Quadro 2)

Quadro 2 – Parâmetros e resultados que influenciam a ACV

PRINCIPAIS PARÂMETROS	Tipo de eletricidade utilizada para o bombeamento
	Equilíbrio entre a geração e a eficiência do bombeamento
	A operação da usina
RESULTADOS DA ABORDAGEM DA ACV	A análise de inventário na ACV inclui dados relacionados ao consumo de materiais (como os materiais dos condutos e turbinas) de energia (a fonte de energia utilizada no bombeamento, por exemplo).
	A ACV não pode ser utilizada como ferramenta única para avaliar o desempenho ambiental de uma tecnologia de armazenamento de energia
	A ACV não dispensa o Estudo de Impacto Ambiental de UHRs.
	A maior parte dos impactos ambientais avaliados pela ACV são observados na fase de construção do empreendimento
	Os principais impactos ambientais observados pela ACV estão associados ao uso de metais para a construção de túneis e da turbina e à fase de escavação e transporte de materiais.

Fonte: ABNT (2001); Torres (2011); Alqub (2018); IFPSH (2021)

#### 4.4 RISCOS E OPORTUNIDADES DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS

A partir da revisão da literatura foram identificadas as principais oportunidades da implementação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis. As oportunidades observadas em literatura estão apresentadas na Tabela 11. Os principais riscos para a implementação de UHRs foram identificados e estão expostos na Tabela 12.

Tabela 11 – Oportunidades observadas para UHRs

<b>Oportunidades</b>	<b>Referência</b>
Fornecimento de grande capacidade de armazenamento de energia	TORRES (2011)
Suporte à penetração das energias renováveis variáveis (ERV), como as usinas eólicas e fotovoltaicas, compensando sua variabilidade e fornecendo muitos serviços auxiliares necessários para operações do sistema de energia	BRASIL (2020b); IFPSH (2021)
Redução da necessidade de reservas operacionais de usinas térmicas convencionais	IFPSH (2021)
Fornecimento de serviço para restaurar o sistema de energia após um apagão	IFPSH (2021)
Redução do ramping, start/stops e operação de carga parcial da frota de geração convencional existente	IFPSH (2021)
Ajuda a evitar ou reduzir as restrições do ERV em caso de sobregeração, e fornece a energia necessária em caso de subgeração devido a erros de previsão meteorológica ou durante tempos de baixa oferta de ERV.	IFPSH (2021)
Maior tempo de vida e menor custo, quando comparado com outras alternativas de armazenamento de energia, como baterias de lítio e ar comprimido	LIMA et al. (2021)
Pouco requisito de operação e manutenção	HUNT et al. (2018)
Regularização da vazão natural	HUNT et al. (2018)

<b>Oportunidades</b>	<b>Referência</b>
Possibilidade de uso múltiplo do reservatório, como o abastecimento humano e agrícola	HUNT et al. (2018)
Controle de enchentes	LIMA (2012); HUNT et al. (2018)

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Tabela 12 – Desafios das UHRs

<b>Riscos</b>	<b>Referência</b>
Os locais de implantação necessitam um conjunto de elementos para serem considerados atrativos, dentre eles: condições topográficas e geotécnicas favoráveis, quantidade de água disponível suficiente, acesso à linhas de transmissão e energia a baixo custo	(ANTAL, 2014).
Necessidade da construção de um empreendimento de médio a grande porte e o represamento de grande volume de água	TORRES (2011); (LIMA et al., 2021)
A eficiência do empreendimento depende, sobretudo, do tipo de eletricidade (renovável ou não) empregada para o bombeamento é determinante para a viabilidade do empreendimento.	TORRES (2011); IFPSH (2021)
Diversos impactos ambientais negativos, decorrentes da construção e operação do empreendimento, como a fragmentação e perda de habitats naturais, perda de áreas produtivas, alteração dos Níveis de Pressão Sonora e Vibração; alteração do regime hidrológico, alteração da paisagem local, Supressão/Alteração da vegetação; frequente variação do nível do reservatório.	IBERDROLA (2009); GÁS NATURAL SDG (2014); FERC (2009); DESARROLLOS DEL ODREA (2021); PATOCKA (2014)
Mais custosa quando comparadas com Usinas Hidrelétricas Convencionais	HUNT et al. (2018)

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como principal objetivo analisar os impactos ambientais que poderão ser causados pela construção e operação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil, além de expor as oportunidades e desafios da implantação desse tipo de empreendimento. Como obstáculos para a execução do trabalho, destaca-se a dificuldade em prever impactos ambientais de empreendimentos hidrelétricos, visto que os efeitos dependerão das características do projeto e da região (meio físico, biótico e socioeconômico) de implantação do empreendimento. Além disso, a análise qualitativa dos impactos ambientais de estudos de diferentes países é dificultada devido aos distintos parâmetros e formas de classificação dos efeitos.

Dentre principais oportunidades da implementação de UHRs, obtidas em literatura, estão: o fornecimento de grande capacidade de armazenamento; o suporte à penetração de energias renováveis variáveis no sistema; a redução da necessidade de usinas térmicas; a possibilidade de usos múltiplos dos reservatórios; e o maior tempo de vida e menor custo, quando comparadas com outras tecnologias de armazenamento, como baterias de lítio e ar comprimido. Dentre os riscos estão a necessidade de locais com um conjunto de elementos atrativos para a construção do empreendimento e os impactos ambientais negativos decorrentes do represamento de grande volume de água.

O estudo permitiu concluir também que a abordagem da Avaliação do Ciclo de Vida é uma importante ferramenta de apoio para a tomada de decisões e avaliação do desempenho ambiental de UHRs. No entanto, pontua-se que a ACV não pode ser utilizada como uma ferramenta única e não dispensa o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) dos empreendimentos hidrelétricos. Como principais parâmetro que influencia a ACV de uma UHR, destacam-se o tipo de energia utilizado para o bombeamento (renovável ou não), a eficiência do bombeamento e a operação da usina.

## **5 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Para futuros trabalhos, sugere-se:

- Comparação entre os impactos ambientais de UHRs de circuito aberto e fechado;
- Análise de fluxo e temperatura de reservatórios superiores de Usinas Hidrelétricas Reversíveis.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALQUB, A. M. *Design and Life Cycle Assessment of Pumped Hydro Energy Storage System for Nablus Western Wastewater Treatment Plant.* Nablus, Palestina, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 14040:** Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e Estruturas. Rio de Janeiro, 2001.

BENTO, A. **Como fazer uma revisão da literatura:** Considerações teóricas e práticas. Revista ,n° 65, ano VII (pp. 42-44). ISSN: 1647-8975. 2012.

BERTONE, A. C; BUENO, M. L.;KEPPEN, R. P. T.; DETZEL, D. H. M. *Acumulation and run-of-the-river hydropower plants: a study of the Brazilian hydroenergetic system.* IAHR World Congress: Panama, 2019.

BORGES, S.R.; SILVA, V. P. **Usinas Hidrelétricas no Brasil:** a relação de afetividades dos atingidos com os lugares inundados pelos reservatórios. Caminhos da Geografia: v.12, n40. p 222-231. Uberlândia, 2011.

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Estudos de inventário de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR):** Metodologia e resultados preliminares para o Estado do Rio de Janeiro. 2019.

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional (BEN):** ano base 2019. Brasília, 2020.a

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (PDE2030):** Brasília, 2020. b

BRASIL. **Lei nº6.938, de 31 de agosto de 1981.** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, 1981.

BRASIL. **Lei nº9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm). > Acesso em 20 abr. 2022.

CAMPOS, S. R. M.; SILVA, C. P. **A Efetividade do Estudo De Impacto Ambiental e do Licenciamento em Projetos de Usinas Hidrelétricas.** Uberlândia, 2012.

CANALES, F. A.; BELUCO, A.; MENDES, C. A. B. **Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo:** aplicação e perspectivas. Instituto de Pesquisas Hidráulicas: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

CARVALHO, A. R. L. **Reservatórios de Regularização de Usinas Hidrelétricas:** Contribuição para uma matriz energética mais limpa. Rio de Janeiro, 2015.

CARVALHO, D. N.; BONIOLO, M. R.; SANTOS, R; G.; BATISTA, L. V.; MALAVAZZI, A. A.; REIS, F. A. G. V.; GIORDANO, L. C. **Crerios Usados na Definição de Áreas de Influências ,Impactos e Programamas Ambientais em Estudos de Impacto Ambiental de Usinas Hidrelétricas Brasileiras.** Geociências, v. 37, n. 3, p. 639-653. São Paulo, 2018.

COMISSÃO FEDERAL DE REGULAÇÃO DE ENERGIA - FERC. **Final Environmental Impact Statement for Hydropower License: Swan Lake North Pumped Storage Project.** Oregon, EUA, 2019.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS - CBDB. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens,** Ano VII, n10. ISSN: 2594-7451. 2021.

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS – SPANCOLD. **Guías técnicas de seguridad de presas: medio ambiente de presas y embalses.** Colégio de engenheiros de caminhos, canais e portos. Espanha, 2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986.**

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. SECRETARIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ENERGIAS RENOVÁVEIS. *“What is pumped storage hydropower?”*. Disponível em: < Pumped Storage Hydropower | Department of Energy> Acesso em: 20 mai. Estados Unidos, 2022.

DESARROLLOS DEL ODREA, S.L.U. *Documento Inicial del Proyecto: Central Hidroeléctrica Reversible Talavera (18,09 GWh–1.672 MWe)*. Espanha, 2021.

ECHER, I. C. **A Revisão de Literatura na Construção do Trabalho Científico**. R. gaúcha Enferm. v.22, n2, p5-20. Porto Alegre, 2001.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. CONSÓRCIO CONCREMAT-LEME ENGENHARIA. **Estudo de Impacto Ambiental – EIA: UHE Teles Pires**. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ELETRICA>> Acesso em: 08 out. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório de Impacto Ambiental (RIMA): UHE Teles Pires**. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Sistema de Armazenamento em baterias: Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento**. 2019.

EMPRESA METROPOLITANA DE ÁGUAS E ENERGIA S.A. – EMAE. **Usina Elevatória Pedreira**. Disponível em: < <http://www.emae.sp.gov.br/elevatorias.htm> > Acesso em: 13 jun. 2022.

ENGEVIX. **Estudo de Impacto Ambiental: UHE Barra Grande**. Brasil, 1977.

ENGEVIX. **UHE de Barra Grande – Relatório de Impacto ao Meio Ambiente**. Brasil, 1977.

ESPAÑA. **Real Decreto 1.1331, de 30 de setembro de 1988.**

ESTADO DE *NEW SOUTH WALES* - NSW. *NSW Electricity Infrastructure Roadmap*. Departamento de Planejamento, Industria e Meio Ambiente de *New South Wales*, Austrália. 2020.

FURNAS. **Relatório Ambiental Volume I – Usina Hidrelétrica Porto Colômbia**. 2004.

FURNAS. **Relatório Ambiental Volume II – Usina Hidrelétrica Porto Colômbia**. 2004.

FURNAS. **Relatório Ambiental: Usina Hidrelétrica de Funil: Volume I**. 2004.

FURNAS. **Relatório Ambiental: Usina Hidrelétrica de Funil: Volume II**. 2004.

GAS NATURAL SDG, S.A. *Documento síntese do Estudo de Impacto Ambiental: CHR Salas-Concha*. 2014.

GOMES, R. O. **Estudo de Impacto da Incorporação de Usinas Hidrelétricas a Fio D'Água no Sistema Interligado Nacional**. Juiz de Fora, 2012.

HUNT, J.J. D.; BYERS, E.. RIAHI, K., LANGAN, S. *Comparison between seasonal pumped-storage and conventional reservoir dams from the water, energy and land nexus perspective*. *International Institute for Applied Systems Analysis*: Vienna, Austria, 2018.

HYDROWIRES. *Pumped Storage Hydropower Valuation Guidebook: A Cost-Benefit and Decision Analysis Valuation Framework*. Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, 2021.

IBERDROLA. *Estudio de Impacto Ambiental del Aprovechamiento Hidroeléctrico de Bombeo Santa Cristina Y La Línea Eléctrica De Conexión (Provincia De Ourense)*. 2009.

INTERNATIONAL FORUM PUMPED STORAGE HYDROPOWER – IFPSH. *Pumped Storage Hydropower: Capabilities and Costs*. 2021. (a)

INTERNATIONAL FORUM PUMPED STORAGE HYDROPOWER – IFPSH. *Working Paper on Sustainability of Pumped Storage Hydropower*. 2021. (b)

INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION – IHA. *New tool maps world's water batteries: the clean storage solution for renewables*. Disponível em: <

<https://www.hydropower.org/news/new-tool-maps-world-e2-80-99s-water-batteries-the-clean-storage-solution-for-renewables> > [https://www.hydropower.org/news/new-tool-maps-world-e2-80-99s-water-batteries-the clean-storage-solution-for-renewables](https://www.hydropower.org/news/new-tool-maps-world-e2-80-99s-water-batteries-the-clean-storage-solution-for-renewables) > Acesso em: 21 jun. 2022. (a)

*INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION – IHA. Pumped hydro: Water batteries for solar and wind power.* Disponível em: < <https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage> > Acesso em: 22 jun. 2022. (b)

*INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION – IHA. Pumped Storage Tracking Tool.* Disponível em: < <https://professional.hydropower.org/page/map-pumped-storage-tracking-tool> > Acesso em 21 jun. 2022. (c)

*INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION – IHA. The world's water battery: Pumped hydropower storage and the clean energy transition.* Londres, Reino Unido, 2018.

ITAIPU BINACIONAL. **Energia Hidráulica.** Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/energia-hidraulica>> Acesso em: 02 jun. 2022.

JANSEN, R. B. *Dams and public safety.* US Department of the Interior. Bureau of Reclamation, 1983.

LIMA, F. E. M. **O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo.** Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2012.

LIMA, L. S.; QUARTIR, M.; BUCHMAYR, A.; SANJUAN-DELMÁS, D.; LAGET, H.; CORBSIER, D.; MERTENS, J; DEWULF, J. *Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems.* 2021.

*MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE – MAPA. Generación de energía a partir del agua: Tipos de centrales hidráulicas y elementos que las conforman y minicentrales hidroeléctricas.* Disponível em: <<https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion->

agua/310generaciondeenergiaapartirdelaguatiposdecentraleshidraulicasyelementosquelasconormanyminicentraleshidroelectricas\_tcm30-215763.pdf> Acesso em 20 mai. 2022.

MOURA, M. R. F.; SILVA, S. R. **Lei das águas e a gestão dos recursos hídricos no Brasil:** contribuições para o debate. Periódico Eletrônico Fórum Ambiental Da Alta Paulista. 2017.

*NATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION -NHA. 2021 Pumped Storage Report.* Disponível em: < <https://www.hydro.org/wp-content/uploads/2021/09/2021-Pumped-Storage-Report-NHA.pdf> > Acesso em: 13 jun. 2022.

NORTE ENERGIA. **Usina Hidrelétrica a fio d'água e menor área alagada.** Disponível em: < <https://www.norteenergiasa.com.br/pt-br/uhe-belo-monte/arranjo#:~:text=Usina%20a%20fio%20d'%C3%A1gua%2C%20Belo%20Monte%20se%20caracteriza%20por,diques%20e%20canais%20de%20transposi%C3%A7%C3%A3o> > Acesso em: 02 jun. 2022.

OCHOA, G. J.; DETZEL, D. H. M.; MINE, M. R. M. **Avaliação de diferentes cenários de regularização para um sistema hidrelétrico.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis, 2017.

OLIVEIRA, N. C. C. **A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil.** Varia Historia, Belo Horizonte, vol. 34, n. 65, p. 315-346, mai/ago 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICA – ONS. **Plano de Operação Energética (PEN) 2020/2024:** Sumário Executivo. Brasil, 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICA – ONS. **Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN (SINDA).** Disponível em: < <http://sindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema> > Acesso em 24 mai. 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICA – ONS. **Sobre o SIN: O sistema em números.** Disponível em < <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros> >. Acesso em: 24 mai. 2022.

PATOCKA, F. *Environmental Impacts of Pumped Storage Hydro Power Plants*. Norwegian University of Science and Technology. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Noruega. 2014.

PEREIRA, G. M. **História das Usinas Hidrelétricas**. Universidade de Brasília, DF, 2015.

PITRE, S.M.C. *Análisis del comportamiento de centrales hidroeléctricas de bombeo en la operación de sistemas interconectados*. Santiago de Chile, 2015.

SERRA, J. P; OLIVEIRA, T. A. **Impactos ambientais decorrentes da construção de barragens de hidrelétricas: reflexões e desdobramentos físico-naturais**. P.64-83.. 2020.

SOARES, I. M. **Usina Hidrelétrica a fio d'água ou reservatório?** Subsídios à tomada de decisão por meio de análise custo-efetividade. Brasília, 2017.

SOUZA, W, L. **Impacto Ambiental de Hidrelétricas**: uma análise comparativa de duas abordagens. Rio de Janeiro, 2000.

TEIXEIRA, E. B. **A Análise de Dados na Pesquisa Científica**: importância e desafios em estudos organizacionais. P 177-201. 2003.

TORRES, O. *Life cycle assessment of a pumped storage power plant*. Norwegian University of Science and Technology: Departamento de Engenharia de Energia e Processos. Noruega, 2011.