

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

**Análise ambiental de projeto de armazenamento de energia
via Usina Hidrelétrica Reversível**

Danielle Rodrigues Raimundo

Itajubá, 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Danielle Rodrigues Raimundo

**Análise ambiental de projeto de armazenamento de energia
via Usina Hidrelétrica Reversível**

**Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Energia como parte
dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Ciências da
Engenharia de Energia**

**Área de Concentração: Energia,
Sociedade e Meio Ambiente**

**Orientador: Prof. Dr. Geraldo
Lúcio Tiago Filho**

Itajubá, 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Danielle Rodrigues Raimundo

Análise ambiental de projeto de armazenamento de energia
via Usina Hidrelétrica Reversível

Dissertação aprovada por banca examinadora em 31 de Maio de 2019, conferindo à autora o título de **Mestre em Ciências da Engenharia de Energia**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho (Orientador)

Prof.^a Dr.^a Regina Mambeli Barros

Prof.^a Dr.^a Maria Cláudia Costa de Oliveira Botan

Prof. Dr. Célio Bermann

Itajubá, 2019

À minha família, meu alicerce eterno.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço à Deus e à Nossa Senhora Aparecida, minhas fontes inesgotáveis de força, fé e sabedoria.

À minha família, por ser meu apoio em todos os momentos. Ao meu amado pai, por todo amor e carinho, paciência e pelas caronas à Itajubá que tanto me ajudaram. À minha amada mãe, pelos abraços reconfortantes, amor, paciência e força. À minha amada irmã, pelas risadas, abraços e companhia, que tornaram mais leve essa jornada. Ao meu namorado, pela paciência, carinho, por sempre me ouvir e apoiar quando preciso.

Aos amigos que fiz no mestrado, meus agradecimentos pelos momentos de amizade, estudos, por compartilharem seus conhecimentos e angústias. Aos meus eternos amigos da graduação, por estarem sempre comigo nos momentos difíceis e nos alegres.

Meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, professor Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho, pelo auxílio, suporte, paciência e oportunidade.

À equipe do CERPCH, por todo apoio e ajuda.

À todos os colegas e professores que de alguma forma contribuíram para essa dissertação.

À UNIFEI, por desempenhar papel tão importante em minha formação acadêmica e profissional.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

O crescimento das fontes renováveis de energia, como a eólica e a solar, consideradas como fontes intermitentes, tem levantado a questão do armazenamento de energia, como forma de garantir a confiabilidade do sistema energético e atender à demanda crescente dos diversos países pelo mundo. Dentre as formas de armazenamento de energia, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) vem ganhando destaque por sua maturidade tecnológica e grande capacidade de atendimento à demanda nos horários de ponta. O objetivo deste trabalho é elaborar um *check-list* dos impactos ambientais das UHRs e desenvolver uma metodologia quantitativa para avaliar esses impactos. Para tanto, fez-se uma revisão bibliográfica na literatura nacional e internacional, listando todos os impactos ambientais decorrentes das UHRs, nos meios físico, biótico, antrópico e legislativo. Num primeiro momento, com essa lista de impactos, elaborou-se um questionário, aplicado nos alunos de pós-graduação em Engenharia de Energia da UNIFEI, onde foram atribuídos pesos para cada impacto. Num segundo momento, os mesmos alunos avaliaram os mesmos impactos, atribuindo-lhes notas de 0 a 1, porém dentro do contexto do estudo de caso de Curuá-Una. Ao final, as notas foram compiladas com seus respectivos pesos e obteve-se a nota média para a UHR proposta pelo estudo de caso. Os resultados mostraram que o meio biótico seria o meio mais afetado, e que existe a necessidade de análises mais aprofundadas dos impactos positivos e negativos do empreendimento, a fim de justificar sua implantação.

Palavras-chave: armazenamento de energia, usinas hidrelétricas reversíveis, impactos ambientais, análise quantitativa.

ABSTRACT

The growth of renewable sources of energy, considered as intermittent sources, has raised the issue of energy storage as a way to guarantee the reliability of the energy system and to meet the growing demand of the various countries around the world. Among the forms of energy storage, Pumped Hydropower Energy Storage (PHES) have been gaining prominence due to their technological maturity and great capacity to meet demand at peak times. The objective of this work is to prepare a checklist of the environmental impacts of PHES and to develop a quantitative methodology to evaluate these impacts. For this, a bibliographic review was done in the national and international literature, listing all the environmental impacts resulting from the PHES, in the physical, biotic, anthropic and legislative environments. At first, with this impacts' list, a questionnaire was developed, applied to postgraduate students in Energy Engineering at UNIFEI, where weights were assigned for each impact. Secondly, the same students evaluated the same impacts, assigning grades from 0 to 1, but within the context of the Curuá-Una case study. At the end, the notes were compiled with their respective weights and the average grade for the PHES proposed by the case study was obtained. The results showed that the biotic environment would be the most affected, and that there is a need for deeper analysis of the positive and negative impacts of the enterprise, in order to justify its implementation.

Key words: energy storage, pumped hydropower energy storage, environmental impacts, quantitative analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Potencial de impacto ambiental	23
Figura 2- Duração da descarga X Capacidade de armazenamento	36
Figura 3 - Eficiências de cada tecnologia de armazenamento.....	37
Figura 4 - Maturidade das tecnologias de armazenamento de energia.....	38
Figura 5 - Capacidade armazenada no mundo.	39
Figura 6 - Evolução da capacidade instalada de UHRs nos EUA.....	41
Figura 7 - Matriz elétrica brasileira no ano de 2017.....	42
Figura 8 - Risco de déficit de potência no SIN até 2026.....	43
Figura 9 - Projeção de crescimento das fontes de energia até 2026	44
Figura 10 - Esquematização de uma usina reversível.....	45
Figura 11 – Projeto da UHR Ludington, nos Estados Unidos, de circuito aberto (à esquerda); UHR Goldisthal, na Alemanha, de circuito semi-aberto (centro) e UHR Limberg II, na Áustria, de circuito fechado (à direita).	46
Figura 12 - Energia recuperada em uma UHR	48
Figura 13 – Exposição da zona litorânea durante a operação de usinas reversíveis.	60
Figura 14 – Esquematização da montagem da planilha com o <i>check-list</i> de impactos ambientais.....	66
Figura 15 - Localização da UHE Curuá-Una no estado do Pará (à esquerda); UHE Curuá-Una (à direita).....	73
Figura 16 - Vista geral das localizações dos reservatórios da PCHR e da planta CHUBQ	74
Figura 17 – Resultados finais para o estudo de caso analisado	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre as tecnologias de armazenamento apresentadas (FONTE: elaborado pela autora)	34
Tabela 2 - Comparação entre as perdas de energia para as diferentes tecnologias de armazenamento	38
Tabela 3 - Capacidade instalada de usinas reversíveis, por país, em 2014.	40
Tabela 4 - Características e benefícios das UHRs comparadas a outras tecnologias	50
Tabela 5 – Escala de Notas.....	68
Tabela 6 – Dados técnicos da PCH Reversível (FONTE: ELETRONORTE, 2018).....	74
Tabela 7 – Resultados obtidos para o meio físico	82
Tabela 8 – Resultados obtidos para o meio biótico	83
Tabela 9 – Resultados dos meios antrópico e legislativo	85
Tabela 10 – Resultado final para a UHR de Curuá-Una	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – *Check-list* de impactos ambientais das UHRs77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAS – Amostragem Aleatória Simples

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

AIA – Avaliação de Impacto Ambiental

CAES – *Compressed Air Energy Storage*

CERPCH - Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas.

CHUBQ- Central Hidrelétrica de Ultrabaixa Queda

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

Eletronorte – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EQPS - *Elmhurst Quarry Pumped Storage Project*

ESA – *Energy Storage Association*

EUA – Estados Unidos da América

GEE – Gases de Efeito Estufa

PCHR – Pequena Central Hidrelétrica Reversível

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

SIN – Sistema Interligado Nacional

UHE – Usina Hidrelétrica

UHR – Usina Hidrelétrica Reversível

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Os sistemas de armazenamento de energia no contexto energético mundial e nacional 15	
1.2. Justificativa.....	17
1.3. Objetivos.....	19
1.4. Estrutura da dissertação	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. O conceito de impacto ambiental e a avaliação de impacto ambiental	21
2.2. O armazenamento de energia	27
2.3. Sistemas de armazenamento de energia	27
2.3.1. Baterias de estado sólido.....	28
2.3.2. Baterias de fluxo	29
2.3.3. Volantes de inércia.....	29
2.3.4. Ar comprimido.....	30
2.3.5. Armazenamento térmico	30
2.3.6. Armazenamento hidráulico	31
2.3.7. Supercondutores.....	33
2.3.8. Hidrogênio	33
2.3.9. Comparativo entre as tecnologias de armazenamento de energia	34
3. USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS	40
3.1. Capacidade instalada no mundo	40
3.2. Perspectivas para as usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil	42
3.3. Características das UHRs	45
3.4. Benefícios das UHRs.....	48
3.5. Os impactos ambientais das UHRs.....	51
3.5.1. Impactos ao meio físico	52
3.5.2. Impactos ao meio biótico	58
3.5.3. Impactos ao meio antrópico	61
3.5.4. Impactos ao meio legislativo	64
4. METODOLOGIA	66
4.1. <i>Check-list</i> de impactos ambientais das UHRs	66
4.2. Aplicação do método quantitativo utilizando estudo de caso.....	67

4.3. Definição da incerteza da amostragem.....	70
5. ESTUDO DE CASO	72
5.1. Estudo de caso “Curuá-Una”	72
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
6.1. <i>Check-list</i> de impactos ambientais das UHRs	77
6.2. Aplicação do método quantitativo utilizando estudo de caso.....	81
6.3. Definição da incerteza da amostragem e limitações do método.....	89
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
7.1. Sugestões para trabalhos futuros	92
8. PRODUÇÃO ACADÊMICA.....	93
9. REFERÊNCIAS	94

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos séculos, a evolução da raça humana permitiu ao homem exercer domínio sobre o planeta e seus seres vivos, dando-o autonomia e controle para transformar a natureza de forma a atender às suas necessidades, passando do domínio do fogo até a construção de enormes espaçonaves que permitem explorar o universo.

Dentro da própria evolução, o conceito de energia é fundamental desde o início. Um milhão de anos atrás, as necessidades do homem primitivo eram muito simples e ligadas principalmente à sua sobrevivência. Por essa razão, dependia apenas de cerca de 2 mil quilocalorias diárias extraídas dos alimentos que conseguia obter. Com o passar dos anos, o homem passou pela dominação dos animais que serviam como tração, o fogo, a lenha, o aproveitamento de quedas d'água e do vento, até chegar à Revolução Industrial, quando se iniciou o uso das máquinas a vapor, motores de combustão interna, e posteriormente a energia elétrica e o petróleo (GOLDEMBERG & LUCON, 2007).

Nos dias atuais, o homem vem presenciando os efeitos do desenvolvimento tecnológico ao meio ambiente e, na tentativa de minimizar os impactos ambientais provenientes da produção de energia elétrica, sem a qual o ser humano não vive, as fontes renováveis de energia vem sendo cada vez mais exploradas pelos países do globo, como uma alternativa aos combustíveis fósseis.

Os conceitos de fontes renováveis e energia limpa muitas vezes se confundem. Energia limpa se define como a fonte de energia que não produz dióxido de carbono quando gerada. Nesse conceito se enquadram a energia hidrelétrica, nuclear, solar, geotérmica, eólica, entre outras (LEE, 2013). Já o conceito de fontes renováveis envolve a questão do horizonte de tempo geológico em sua definição. O conceito de *renovável* acarreta a ideia de que esse elemento será repostado, renovado, com o passar do tempo. Isso acontece com o petróleo e o carvão mineral, por exemplo. Ao longo de milhares de anos, a matéria orgânica acumulada no solo será transformada nesses combustíveis fósseis. De certa forma, então, o petróleo é um combustível renovável, porém requer uma escala de tempo de milhões de anos para se recompor na natureza. Diferentemente dos ventos, marés, biomassa, energia solar e potenciais hidráulicos, que são repostos na natureza em uma escala de tempo infinitamente menor. Então, todas essas fontes de energia são renováveis. O que altera a definição é justamente a escala de tempo. Ou seja, por envolverem um horizonte temporal de milhões de anos, os combustíveis fósseis são

considerados *não-renováveis*. Já as fontes eólica, solar, hidrelétrica, entre outras, são consideradas *fontes renováveis* (GOLDEMBERG & LUCON, 2007).

1.1. Os sistemas de armazenamento de energia no contexto energético mundial e nacional

As fontes de energia limpa tem ganhado cada vez mais espaço nas matrizes energéticas do planeta, impulsionadas principalmente pela preservação ambiental e o combate aos efeitos do aquecimento global. Uma vez que essas fontes possuem grande variabilidade em seus ciclos de produção, sejam eles diários, sazonais, anuais ou multianuais (MARTÍN et al, 2011), o aumento do consumo das fontes de energia limpa, consideradas intermitentes, aliado às flutuações de demanda, tem levantado a questão do armazenamento de energia e seus efeitos na rede elétrica (GUNEY & TEPE, 2017).

O desenvolvimento dos sistemas de armazenamento de energia é fundamental para permitir a expansão da produção de energias limpas, tanto em pequena quanto em larga escala. A função desses sistemas é regular e nivelar as flutuações diárias dessas fontes, garantindo, assim, maior estabilidade e confiabilidade ao sistema elétrico (COUTO, 2012). Ademais, muito além de serem soluções técnicas gerenciais da rede, os sistemas de armazenamento contribuem para a utilização de energias limpas e sua autonomia (SILVA, 2008).

Existem vários sistemas de armazenamento de energia, como ar comprimido (*Compressed Air Energy Storage - CAES*), baterias, volantes de inércia, banco de capacitores, armazenamento de hidrogênio e o armazenamento hidráulico, que incluem as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs).

A ideia básica é que um sistema de armazenamento de energia, independentemente de sua natureza, tem como objetivo armazenar as sobras de energia que ficam disponibilizadas no sistema no horário de baixa demanda, e disponibilizá-las ao próprio sistema, no horário de alta demanda, também denominado de horário de pico. Assim, parte da energia que não seria utilizada no período de baixa demanda é disponibilizada no horário de pico.

As usinas reversíveis, objeto de estudo do presente trabalho de dissertação, são constituídas por dois reservatórios, localizados em cotas diferentes, interligados por um sistema de adução e grupos de máquinas reversíveis que ora operam como bomba, ora como turbina, de acordo com o seguinte ciclo: nos horários de pico, a água escoo do reservatório superior para o inferior,

acionando um gerador elétrico através de uma turbina hidráulica. Nos períodos de baixo consumo, a água é bombeada para o reservatório superior, a fim de ser utilizada novamente nas horas de alto consumo (TIAGO FILHO, 2016).

Atualmente, existem em torno de 130 GW de capacidade instalada de usinas reversíveis pelo mundo, sendo o Japão, a China e os Estados Unidos os países com as maiores potências (BARBOUR et al, 2016).

No Brasil, segundo Canales et al (2015), existem apenas quatro usinas, localizadas nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, que podem ser classificadas como reversíveis, porém apenas duas delas atuam eventualmente como UHR:

- a) Usina Elevatória de Pedreira, inaugurada em 1939, sendo a primeira unidade reversível do mundo em operação comercial. Possui 8 (oito) unidades geradoras e apenas uma reversível, todas com turbina tipo Francis, com potência total de 108 MW. Esta usina transfere as águas do canal Pinheiros para o reservatório Billings, a uma vazão de 395 m³/s. O crescimento populacional da cidade de São Paulo, a partir da década de 1950, caracterizou um aumento significativo no volume de esgoto doméstico a ser recolhido e tratado, porém as obras de saneamento básico não acompanharam este crescimento com a mesma velocidade. Este fato ocasionou a prática de ligações residenciais do esgoto doméstico em galerias de águas pluviais, levando estes esgotos sem tratar diretamente aos cursos de água, originando a poluição e eutrofização do Rio Pinheiros. Por esta razão, as águas do Canal Pinheiros não podem mais ser bombeadas continuamente para o Reservatório Billings;
- b) Usina Elevatória de Traição, inaugurada em 1940 com o objetivo de reverter o curso das águas dos rios Tietê e Pinheiros para a Usina Elevatória de Pedreira e depois ao reservatório Billings. Possui 4 (quatro) unidades reversíveis, com turbinas tipo Kaplan, com potência total de 22 MW e capacidade de bombeamento de 280 m³/s;
- c) Usina Elevatória de Edgard de Souza, inaugurada pela empresa Light em 1901, sendo a primeira usina hidrelétrica da América do Sul, na época denominada Usina Hidrelétrica do Parnaíba. Em 1949, teve seu nome alterado para homenagear o primeiro brasileiro a ocupar um cargo de direção no grupo canadense da empresa. Esta usina foi desativada por considerações ambientais em 1984, com a transferência da unidade reversível para a Usina Elevatória de Pedreira; e

- d) Usina Elevatória de Vigário, inaugurada em 1952 e localizada no reservatório de Santana, no rio Piraí, estado do Rio de Janeiro. Responsável por elevar em quase 36 metros as águas do reservatório de Santana para o reservatório de Vigário, utilizando quatro turbinas reversíveis de 22 MW cada. A usina elevatória de Vigário geralmente funciona em modo de bombeamento, com capacidade de 188,8 m³/s. Esta usina, em conjunto com a usina elevatória de Santa Cecília, 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.

O Brasil ainda apresenta grandes dificuldades para a construção de novas usinas e que operem, de fato, como reversíveis. Essas dificuldades decorrem principalmente por restrições ambientais, regulatórias e, conseqüentemente, de mercado, que impedem o desenvolvimento desse e de qualquer outro tipo de sistema de armazenamento de energia no país. Entretanto, nos últimos anos, tem havido várias discussões entre os agentes do governo, com o surgimento de novas propostas para solucionar esses impasses, podendo tornar possível introduzir esse conceito do armazenamento de energia e integrá-lo ao sistema de suprimento de eletricidade no país (FERREIRA, 2016).

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar os impactos ambientais das UHRs e desenvolver uma metodologia para quantificar esses impactos, utilizando um estudo de caso selecionado. Dessa forma, essa dissertação espera fornecer um ponto de partida para avaliações ambientais mais complexas, auxiliando no atendimento às restrições ambientais, que se constituem como um dos principais entraves atuais ao desenvolvimento das UHRs no Brasil.

1.2. Justificativa

Em tempos mais recentes, a necessidade do desenvolvimento dos sistemas de armazenamento de energia tem sido largamente discutida, no que diz respeito ao planejamento do setor energético, frente à expansão das fontes renováveis intermitentes: solar, eólica e hidráulica de passagem, sem reservatório. À medida que cresce a contribuição dessas fontes, a intermitência inerente do fornecimento de tais tecnologias geradoras deve ser abordada por uma mudança gradual no armazenamento de energia, exigindo sistemas cada vez mais versáteis de armazenamento (HALL & BAIN, 2008). Por esse motivo, a capacidade de armazenamento de energia é fundamental para garantir uma matriz energética confiável e segura, além de dar

suporte à expansão da participação das fontes de energia limpa, uma vez que garantem a disponibilidade de energia no horário de ponta da curva de demanda (HALL & BAIN, 2008).

Dentre os sistemas de armazenamento de energia, disponibilizados no mercado ou em desenvolvimento nos centros de pesquisas, as usinas reversíveis estão ganhando espaço no mercado, devido à sua competitividade, em termos técnicos e econômicos. Dentre as formas de armazenamento em larga escala, as usinas reversíveis são a tecnologia com menor investimento por capacidade instalada, maior vida útil e estabilidade, além de apresentarem maior maturidade e praticidade (KONG et al, 2017; SILVA & PARENTE, 2018).

No que tange à grande necessidade de mitigar o aquecimento global, reduzir a queima de combustíveis fósseis constitui-se o principal meio para alcançar este objetivo. Esta queima de combustíveis fósseis só pode ser reduzida se existir algum tipo de energia para substituí-la. A opção de energia limpa é muito popular, mas para ser competitiva e sempre disponível, ela precisa ser armazenada. O armazenamento hidráulico é, portanto, uma peça de grande importância na problemática da mitigação do aquecimento global (NOTSUE, S/d).

Considerando-se, então, a importância do armazenamento hidráulico, o presente trabalho se justifica pela dificuldade que o Brasil encontra na criação e atendimento às regulações ambientais inerentes ao empreendimento das UHRs. A proposta é criar um ponto de partida para uma avaliação de impactos ambientais aplicável às UHRs. Sabe-se que o processo de avaliação de impactos ambientais necessita ser muito mais completo, além de ser intrínseco à cada empreendimento em específico. O presente estudo visa a uma análise inicial, mas já traz uma base para debates ambientais em futuros projetos de usinas reversíveis, uma vez que faz um levantamento de todos os possíveis impactos provenientes desse tipo de empreendimento e aplica esse levantamento a um estudo de caso, utilizando uma metodologia quantitativa. Dessa forma, o presente trabalho contribui para uma análise ambiental das UHRs, que se constitui em uma das principais dificuldades encontradas pelo governo e uma das principais barreiras ao desenvolvimento dessa tecnologia de armazenamento no Brasil.

1.3. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver um estudo ambiental das usinas hidrelétricas reversíveis, avaliando seus impactos ambientais. Como objetivos específicos, têm-se:

- Identificar todos os possíveis impactos ambientais causados por usinas hidrelétricas reversíveis, dentro dos meios físico, biótico, antrópico e também com relação à aspectos regulatórios, por meio de uma revisão bibliográfica;
- Confeccionar um *check-list* de impactos ambientais próprio para usinas hidrelétricas reversíveis;
- Utilizar um estudo de caso baseado em uma proposta de projeto de implantação de uma usina hidrelétrica reversível no Brasil;
- Desenvolver um método quantitativo para analisar e quantificar os impactos ambientais das usinas hidrelétricas reversíveis.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação estará dividida nos seguintes tópicos:

- Capítulo 1: Introdução, onde se apresenta o cenário atual dos sistemas de armazenamento de energia, justificativa e os objetivos a serem atingidos;
- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, onde se apresenta os principais sistemas de armazenamento de energia, os principais conceitos da avaliação de impacto ambiental que são utilizados nessa dissertação e os impactos ambientais das UHRs encontrados na literatura nacional e internacional;
- Capítulo 3: Usinas Hidrelétricas Reversíveis, capítulo dedicado a apresentar essa tecnologia de armazenamento, aspectos técnicos, benefícios, perspectivas no setor energético brasileiro e os impactos ambientais provenientes desse empreendimento;
- Capítulo 4: Metodologia, onde se apresenta como foi desenvolvido o *check-list* de impactos ambientais próprio para UHRs e o método quantitativo utilizado para se obter os resultados pretendidos por essa dissertação;

- Capítulo 5: Estudo de Caso, onde se apresenta o projeto selecionado como base para as análises desta dissertação;
- Capítulo 6: Resultados e Discussão, onde se apresenta o *check-list* de impactos ambientais próprio para UHRs, os resultados da aplicação do método quantitativo e sua discussão;
- Capítulo 7: Conclusão e Recomendações de Trabalhos Futuros;
- Capítulo 8: Produção Acadêmica durante o período do mestrado;
- Capítulo 9: Referências Bibliográficas; e
- Apêndice A: Apresentação do questionário de impactos ambientais, com seus respectivos pesos, aplicado para o estudo de caso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, apresenta-se alguns conceitos fundamentais inerentes ao tema desta dissertação, que são úteis para as discussões apresentadas mais adiante.

2.1. O conceito de impacto ambiental e a avaliação de impacto ambiental

A Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) surgiu pela primeira vez a partir de estudos desenvolvidos nos Estados Unidos, com a promulgação do NEPA - *National Environmental Policy Act* (Lei da Política Nacional do Meio Ambiente), em 1969. Seguindo-se a esta lei, outras pesquisas e medidas foram tomadas na Europa, em função da evolução dos problemas relacionados ao desenvolvimento econômico desvinculado da proteção ao meio ambiente (MILARÉ, 2011 *apud* SANTOS, 2013). Com isso, a Avaliação de Impacto Ambiental passou a ser exigida a partir da década de 1960, quando se consolidou o conceito de impacto ambiental e se estabeleceu o que pode ser objeto da AIA, bem como o que é considerado ou não dano ao meio ambiente. Décadas mais tarde, a Avaliação de Impacto Ambiental se tornou um princípio ambiental consubstanciado em tratados internacionais, ficando estabelecido que a AIA é um instrumento nacional para efetuar atividades planejadas de cunho social, econômico e ambiental, que tenham um impacto adverso sobre o meio ambiente (SANTOS, 2013).

Nos dias atuais, o termo “impacto ambiental” é encontrado com frequência na mídia. No sentido comum, esse termo é, na maioria das vezes, associado a algum dano à natureza, como a mortandade da fauna silvestre após o vazamento de petróleo no mar, ou o rompimento de uma barragem de rejeitos que destrói toda uma comunidade, causando dezenas de vítimas. Embora esse exemplos façam parte do significado de impacto ambiental, eles apenas denotam o lado negativo da definição. O conceito de impacto ambiental possui várias definições, concordantes entre si em diversos pontos, porém com formulações distintas. Para Sánchez (2013), o conceito de impacto ambiental define-se como uma *alteração da qualidade ambiental que resulta da modificação de processos naturais ou sociais provocada por ação humana*. Em sua obra, Sánchez (2013) também destaca outras definições de outros autores:

- Qualquer alteração no meio ambiente em um ou mais de seus componentes – provocada por uma ação humana (MOREIRA, 1992 *apud* SÁNCHEZ, 2013).
- O efeito sobre o ecossistema de uma ação induzida pelo homem (WESTMAN, 1985 *apud* SÁNCHEZ, 2013).

- A mudança em um parâmetro ambiental, num determinado período e numa determinada área, que resulta de uma dada atividade, comparada com a situação que ocorreria se essa atividade não tivesse sido iniciada (WATHERN, 1988a *apud* SÁNCHEZ, 2013).

Pode-se perceber que todas essas definições se aproximam de um ponto em comum, ou seja, a definição de que o impacto ambiental decorre de ações humanas provocadas em uma determinada área. Indo mais além, o conceito de impacto ambiental também se associa aos processos ambientais de um dado ecossistema. Sem as alterações provocadas pelo homem, esse ecossistema terá uma certa escala evolutiva ao longo do tempo, enquanto que com a introdução de uma atividade humana, essa escala evolutiva se alterará completamente, levando esse ecossistema a outro patamar evolutivo, que pode ser positivo ou retrógrado para o meio e seus seres vivos (SÁNCHEZ, 2013).

Outra definição de impacto ambiental, que é válido apresentar, é a definição da Resolução CONAMA nº 001, de 23 de Janeiro de 1986, artigo 1º:

Artigo 1º - Para efeito desta Resolução, considera-se impacto ambiental 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:

I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;

II - as atividades sociais e econômicas;

III - a biota;

IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;

V - a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986).

O potencial de impacto ambiental de uma determinada obra ou ação humana depende de dois fatores, que são muito importantes para o processo de avaliação ambiental (Figura 1): as solicitações impostas ao meio pelo projeto, ou seja, a sobrecarga imposta ao ecossistema; e a vulnerabilidade do meio, ou seja, a capacidade do meio em suportar as solicitações do projeto, que dependem do estado de conservação do ambiente e de solicitações de projetos anteriores, cujos efeitos se acumularam (SÁNCHEZ, 2013). Ainda segundo o autor, projetos que impliquem uma grande solicitação sobre um ambiente de alta vulnerabilidade resultarão em alto potencial de impactos significativos. Por outro lado, projetos de baixa solicitação executados em um meio resiliente não necessitam, a princípio, de grandes avaliações e cuidados especiais. Da mesma forma, projetos propostos em ambientes importantes, com elevadas riquezas ambientais e culturais devem ser criteriosamente avaliados, ao passo que esses mesmos projetos em outro contexto podem até ser dispensados de um estudo de impacto ambiental.

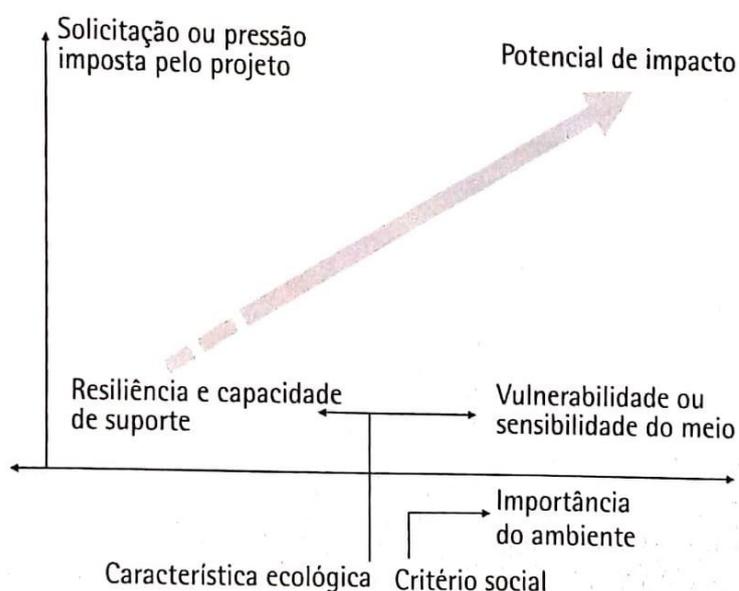


Figura 1 – Potencial de impacto ambiental. (FONTE: SÁNCHEZ, 2013)

A Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) é instrumento da Política Nacional de Meio Ambiente, lei nº 6938/81 (BRASIL, 1981), juntamente com o EIA (Estudo de Impacto Ambiental) e o RIMA (Relatório de Impacto Ambiental). A AIA pode ser considerada como uma ferramenta de gestão ou como um processo. Possui um caráter prévio, buscando antever as possíveis consequências de uma ação presente ou proposta (SÁNCHEZ, 2013). Dessa forma, permite evitar e mitigar os danos de uma determinada atividade, e otimizar seus benefícios, aprimorando a eficácia das soluções. Ao melhorar a qualidade dos dados e permitir o acesso às informações e resultados dos estudos, possibilita a redução dos conflitos de interesse dos diferentes grupos sociais envolvidos. A AIA não é, então, um instrumento de decisão, mas um instrumento de subsídio ao processo de tomada de decisão (PIMENTEL & PIRES, 1992).

A fim de atender aos seus objetivos, a AIA se desenvolve contemplando algumas etapas. Num primeiro momento, deve-se realizar uma identificação da atividade proposta e do ambiente a ser afetado. Depois, segue-se a uma classificação da magnitude dos impactos e suas interações. Por fim, é feita a avaliação, com os resultados das análises e interpretação dos dados, buscando soluções mitigadoras e alternativas (PIMENTEL & PIRES, 1992).

A identificação da proposta e do ambiente afetado é parte integrante do EIA, que se caracteriza como o documento mais importante da avaliação de impactos ambientais, onde se discutem a

viabilidade ambiental do projeto e a necessidade de medidas mitigadoras e compensatórias (ALVARENGA, 2014). A identificação do ambiente também pode ser chamada de diagnóstico ambiental, que caracteriza os meios físico, biótico e antrópico, como descrito por Alvarenga (2014):

a) Meio Físico:

O meio físico se caracteriza pela presença de fatores abióticos, tais como:

- Clima e as condições meteorológicas (perfil de vento, temperatura, umidade do ar, precipitação, entre outros);
- Qualidade do ar (concentração de poluentes);
- Ruído;
- Geologia (características mineralógicas, rochas);
- Geomorfologia (relevo);
- Pedologia (solos, aptidão agrícola, capacidade e uso do solo); e
- Recursos Hídricos (rede hidrográfica, balanço hídrico, transporte de sedimentos, águas subterrâneas, qualidade da água, uso da água, entre outros).

b) Meio Biótico:

O meio biótico se caracteriza pela presença dos fatores referentes aos seres vivos (fauna e flora), tais como:

- Ecossistemas terrestres (cobertura vegetal, interações fauna-flora);
- Ecossistemas aquáticos (populações aquáticas vegetais e animais, bioindicadores); e
- Ecossistemas de transição (ecótonos, manguezais, brejos, pântanos, entre outros).

c) Meio Antrópico:

O meio antrópico, ou socioeconômico, caracteriza-se pelos fatores relacionados ao homem, tais como:

- Dinâmica populacional (distribuição e deslocamento da população, fluxo migratório);
- Uso e ocupação do solo (áreas rurais, urbanas, industriais, estruturas fundiárias, entre outros);

- Nível de vida (educação, saúde, alimentação, lazer, cultura, turismo, segurança, condições habitacionais);
- Estrutura produtiva e de serviços (fatores de produção, emprego, nível tecnológico); e
- Organização social (tensões sociais, grupos e movimentos comunitários, lideranças, associações, forças políticas e sindicais).

Além da alocação nos meios, os impactos ambientais também podem ser classificados de acordo com atributos, segundo Amorim (2018), como quanto ao tipo (positivo ou negativo); quanto ao modo (direto ou indireto); quanto à magnitude (pequena, média ou grande intensidade); quanto à duração (temporário, permanente ou cíclico); quanto ao alcance (local, regional, nacional ou global); quanto ao efeito (curto, médio ou longo prazo); e quanto à reversibilidade (reversível ou irreversível).

Existem variadas metodologias para a Avaliação de Impactos Ambientais. Alguns métodos são mais sistemáticos, outros mais livres (SOUSA, 2000). Os mais famosos são o método AD HOC e a matriz de Leopold. O método AD HOC possui uma análise multidisciplinar, consegue desenvolver a AIA de forma simples, fácil e de maneira dissertativa. É usado quando há escassez de dados e a avaliação deve ser feita em um curto espaço de tempo. É uma metodologia de baixo custo, porém de elevada subjetividade (CREMONEZ et al, 2014). Já a matriz de Leopold refere-se a uma listagem bidimensional, que relaciona os fatores ambientais com as ações provenientes de um dado empreendimento. É um método eficiente na identificação de impactos diretos e de maior intensidade. Porém, é uma análise de muita subjetividade, pode haver duplicidade na relação de impactos e fatores e não há distinção quanto à duração dos impactos (CREMONEZ et al, 2014).

Segundo Barbieri (2007), um dos métodos de avaliação de impacto ambiental mais simples consiste no uso de listas de verificação, ou de controle (*check-lists*), para avaliar e interpretar os impactos que poderão ocorrer devido à implantação de um dado projeto. A elaboração da lista consiste na identificação de características ou indicadores de qualidade ambiental, que podem ser impactados pelas ações previstas do empreendimento. Por exemplo, o uso de recursos naturais, alterações da paisagem, alteração do regime hídrico, erosão, assoreamento, poluição atmosférica e hídrica, geração de resíduos sólidos, ruídos, vibrações, intensificação do tráfego na área de influência, valorização ou desvalorização imobiliária, modificações no estilo

de vida da população local e nas suas fontes de renda, etc. O método de *check-list* possui a vantagem da facilidade operacional, permitindo inclusive a criação de listas padronizadas para determinados tipos de projetos mais comuns. A principal desvantagem é que o método não permite a análise dos impactos de forma interativa, já que possui uma visão segmentada de cada item (BARBIERI, 2007).

Outro método que faz uso de listas de verificação mais elaboradas é o método Battelle-Columbus. Foi desenvolvido inicialmente para avaliar impactos de projetos relacionados com recursos hídricos, sendo adaptado, posteriormente, para outros tipos de projetos, envolvendo outros parâmetros e outros sistemas de ponderação. É um método quantitativo, aplicado para analisar os aspectos de qualidade ambiental da situação “com” e “sem” projeto. Os parâmetros recebem pesos que variam de 0 a 1 e são agrupados em categorias ambientais (BARBIERI, 2007). As vantagens desse método são as mesmas de qualquer lista de verificação, acrescida da possibilidade de quantificação dos impactos listados. Ainda assim, apresenta subjetividade, que pode estar associada ao sistema de ponderação utilizado, e traz as mesmas limitações das listas de verificação unidirecionais, pois ainda é falho no que concerne às interações entre os impactos (FARINACCIO & TESSLER, 2010).

Outro instrumento importante da Política Nacional do Meio Ambiente é o licenciamento ambiental, que se define, de acordo com a Resolução CONAMA 237 de 1997, como um procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras, ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental.

O licenciamento ambiental também contempla as etapas de licenças, com a Licença Prévia (LP), concedida na fase preliminar de um empreendimento, atestando sua viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos a serem atendidos nas próximas fases; Licença de Instalação (LI), que autoriza a instalação propriamente dita de um empreendimento, uma vez atendidas as especificações e com inclusão de medidas de controle ambiental; e Licença de Operação (LO), que autoriza a operação do empreendimento, após efetivo cumprimento de todas as licenças anteriores. Por fim, há a etapa de descomissionamento, que é a licença de desativação de um empreendimento (CONAMA, 1997).

Por fim, tem-se a adoção de medidas mitigadoras e compensatórias. Segundo Sánchez (2013), as medidas mitigadoras são ações propostas com a finalidade de reduzir ou atenuar, em

magnitude ou em importância, os impactos ambientais negativos. Já as medidas compensatórias, ainda segundo o mesmo autor, são ações aplicadas àqueles impactos ambientais que não podem ser evitados, ou mesmo que sejam reduzidos, ainda podem ter magnitude muito elevada. Essas medidas visam a compensar os danos ambientais causados por um dado empreendimento e que não podem ser mitigados satisfatoriamente.

2.2. O armazenamento de energia

Segundo Silva & Bortoni (2016), armazenar significa guardar ou recolher, acumular. Desde a descoberta e os primeiros usos da eletricidade, o ser humano vem buscando formas de armazenar energia, procurando sistemas cada vez mais eficientes e que acompanhem o desenvolvimento tecnológico. A falta de um sistema de armazenamento de energia provoca a necessidade de um ajuste constante da produção, o que pode ocasionar diferença de preços da energia elétrica (GONÇALVES, 2014).

As tecnologias de armazenamento de energia podem desempenhar um papel imprescindível na cadeia completa, desde a geração, transmissão, distribuição até o usuário final. O uso do armazenamento de energia em grande escala permite a mudança da geração centralizada para a geração distribuída, o que oferece inúmeros benefícios, desde o aumento do acesso e disponibilidade de energia à áreas remotas, até melhorias no desempenho, qualidade, segurança e confiabilidade da rede (ROHIT & RANGNEKAR, 2017).

Na geração, o armazenamento permite regulação da voltagem e frequência, nivelamento de carga e melhor habilidade de previsão, além de melhorias na utilização dos sistemas produtores de energia; na transmissão e distribuição, o armazenamento auxilia na estabilidade da rede, regulação da frequência e voltagem, além de reduzir a necessidade de reservas de contingência; e para o consumidor final, o armazenamento aumenta a qualidade e a confiabilidade, uma vez que haverá menos interrupções e menores custos de manutenção, conseqüentemente (ROHIT & RANGNEKAR, 2017).

2.3. Sistemas de armazenamento de energia

Existe uma gama de sistemas de armazenamento de energia no mercado, com características mecânicas, eletroquímicas e físicas, oferecendo uma diversidade de equipamentos, cada qual com diferentes escalas e aplicabilidades (GONÇALVES, 2014). Apesar do grande potencial, a

capacidade de armazenamento de energia elétrica instalada mundialmente é da ordem de apenas 2% da capacidade elétrica total. Desses, 99% são armazenamentos por bombeamento hidráulico nas centras hidrelétricas reversíveis, como discutido em Zareipour (2015, *apud* SILVA & BORTONI, 2016).

São apresentadas, a seguir, de forma breve, as principais tecnologias de armazenamento de energia disponíveis no mercado. As usinas reversíveis, principal objeto de estudo deste trabalho, será discutida detalhadamente mais adiante.

De acordo com a ESA – *Energy Storage Association* (2018), existem 6 (seis) principais categorias de tecnologias de armazenamento de energia, a saber:

- Baterias de estado sólido;
- Baterias de fluxo;
- Volantes de inércia;
- Ar comprimido;
- Térmico; e
- Armazenamento hidráulico.

Além dessas tecnologias, também são apresentados os supercondutores e armazenamento por hidrogênio.

2.3.1. Baterias de estado sólido

Uma bateria é um dispositivo capaz de transformar as reações eletroquímicas em energia elétrica, sendo uma tecnologia vastamente explorada e com grande quantidade de aplicações (COUTO, 2012). Os principais tipos de bateria são as de chumbo-ácido e as de níquel-cádmio, além das de íons de lítio. As baterias são uma tecnologia de armazenamento de energia elétrica com altos benefícios de investimento atualmente, caracterizam-se por modularização, resposta rápida e um alto potencial de comercialização. Com as inovações técnicas atuais e o desenvolvimento de novos modelos, a eficiência e a densidade de energia das baterias melhoraram nitidamente. O fato de exigir pouca manutenção e possuir custos de investimentos relativamente baixos, quando comparadas a alternativas já existentes, além da maturidade tecnológica já alcançada, faz das baterias uma boa alternativa para determinadas aplicações. Por outro lado, esse tipo de armazenamento apresenta tempo de vida útil bastante baixo, devido

à degradação química que sofre, o que se torna uma desvantagem em relação às demais fontes de armazenamento (COUTO, 2012).

2.3.2. Baterias de fluxo

De acordo com Miranda (2011), as baterias de fluxo, conhecidas também como pilhas de combustível reversível, são um sistema de dois eletrólitos em estado líquido (solução salina), separados por uma membrana. As baterias de fluxo superam as limitações das baterias convencionais, pois nas baterias de fluxo a energia é armazenada no próprio eletrólito, aumentando a capacidade de armazenamento. Por esse motivo, possuem variadas aplicações como regulação da variação de tensão, estabilização de frequência, entre outros.

O projeto das baterias de fluxo permite dimensionar sistemas de maneira independente, em termos de potência e energia. Outras vantagens são que baterias de fluxo podem operar em temperatura ambiente, e sua construção é baseada em componentes de plástico nas pilhas do reator, tubulações e tanques, o que se traduz em baterias mais leves e com maior vida útil. As principais desvantagens são os elevados custos de manutenção e elevado volume, o que dificulta a instalação e o transporte (IEEE, 2009).

2.3.3. Volantes de inércia

Segundo a ESA – *Energy Storage Association* (2018), os volantes de inércia são um sistema mecânico rotativo, usado para armazenar energia rotacional, que fica instantaneamente disponível. Basicamente, o volante contém uma fiação em seu centro, movida por um motor. Quando há demanda de energia elétrica no sistema ao qual ele está conectado, a força de rotação atua como uma turbina, produzindo eletricidade e diminuindo a rotação. Após essa ocorrência, o volante é reativado pelo motor, que aumenta sua velocidade de rotação, recompondo, assim, a energia armazenada no volante ao nível anterior ao descarregamento.

Ao contrário das baterias, o volante de inércia é um sistema ambientalmente amigável a um curto-médio prazo, e possui vários ciclos de carga e descarga. Dessa forma, os volantes podem ser empregados para várias funções, como melhorias na qualidade e estabilidade dos sistemas, e auxílio na integração das energias renováveis. Outras vantagens são os tempos de resposta rápidos, ausência de materiais tóxicos, baixas emissões de CO₂ e baixa manutenção aliada a um elevado ciclo de vida (OBERHOFER, 2012). As desvantagens são o alto custo inicial e baixa

densidade de energia, o que limita a aplicação dos volantes de inércia para tecnologias maiores, como projetos espaciais e militares (ARANI et al, 2017).

2.3.4. Ar comprimido

O ar comprimido, também conhecido pela sigla em inglês CAES (*Compressed Air Energy Storage*), é uma tecnologia de armazenamento de energia elétrica utilizada em sistemas de turbinas a gás de alta potência, que pode fornecer uma potência de saída de mais de 100 MW (LUO et al, 2015).

Durante os períodos de baixa demanda de consumo, o excedente de energia aciona uma unidade de motor/gerador reversível, que por sua vez aciona uma cadeia de compressores, que irão injetar ar em um local de armazenamento, como cavernas e formações subterrâneas. A energia, então é armazenada sob a forma de ar a alta pressão. Quando a demanda é alta, o ar comprimido armazenado é liberado e aquecido por uma fonte de calor, e a energia gerada é captada pelas turbinas. O calor residual pode ser reciclado por uma unidade de recuperação (LUO et al, 2015). Para o bom funcionamento dos sistemas de ar comprimido, são necessárias características geológicas adequadas, como minas, cavernas de sal ou poços (IEEE, 2009).

O CAES pode ser utilizado em sistemas de grande escala, pronto para ser utilizado em plantas inteiras de energia. Em locais adequados, o CAES não requer instalações enormes e caras, emitindo quantidades bem menores de gases de efeito estufa do que plantas de gases convencionais. A principal desvantagem constitui-se exatamente na dependência geológica para a correta operação do sistema (HADJPASCHALIS et al, 2009).

2.3.5. Armazenamento térmico

Os sistemas de armazenamento térmico são utilizados para armazenar calor ou frio para uso posterior, sob diferentes condições. Os sistemas de armazenamento térmico são aplicáveis para vários fins industriais e residenciais, como aquecimento de ambientes ou arrefecimento, refrigeração, produção de água quente ou geração de eletricidade (GUNEY & TEPE, 2017).

Em seu trabalho sobre armazenamento térmico, Alva et al (2018) discutem algumas tecnologias, como energia solar térmica dos painéis fotovoltaicos e das plantas solares. Apesar de ter potencial para suprir a demanda energética de todo o mundo, a energia solar ainda é subutilizada. Na geração de eletricidade, são usados os painéis fotovoltaicos ou a planta de

energia solar. Dadas as características de intermitência da energia solar, ambos os sistemas necessitam de dispositivos de armazenamento de energia. Em um trabalho anterior, Alva et al (2017) comentam que os painéis fotovoltaicos geralmente estocam energia com o auxílio de baterias; já as plantas solares utilizam o armazenamento térmico de energia. O aprimoramento desses sistemas de armazenamento térmico é crucial para garantir a competitividade das plantas solares perante os sistemas fotovoltaicos, em sistemas de larga escala. O desempenho desses sistemas está intimamente ligado ao tipo de material empregado e suas propriedades. A água se constitui como um dos melhores meios para o armazenamento de energia solar térmica, com vantagens de baixo custo, grande disponibilidade, não toxicidade e elevado calor específico. Porém, é mais bem utilizada para aquecimentos de residências e água quente. Outro material a ser considerado é o óleo mineral, que atua como fluido de transferência de calor. O óleo mineral coleta o calor e o transporta para caldeiras, onde o vapor é gerado para acionar uma turbina. Por se constituir um sistema direto, o óleo mineral dispensa a necessidade de um trocador de calor, o que reduz os custos, e é capaz de operar a altas temperaturas (400 °C) na forma líquida. Apresenta vantagens em relação a outros materiais, como os sais fundidos, pois não congela durante a noite. Mas com novas pesquisas, os sais já vêm solucionando esse problema, o que provoca uma tendência de uso conjunto dos sais com o óleo mineral nas plantas solares. Os sais fundidos, por sua vez, são o material mais utilizado nas plantas solares atualmente, apresentando altas densidades de armazenamento de energia a um custo barato. Também operam a temperaturas elevadas e a questão do congelamento nos períodos noturnos já vem sendo erradicada com o uso combinado ao óleo mineral. Porém, são agentes oxidantes e possuem alta capacidade de corrosão. Além disso, caracterizam-se por baixa condutividade térmica, e variação de volume de até 6% no processo de fusão (ALVA et al, 2017).

2.3.6. Armazenamento hidráulico

De acordo com a ESA – *Energy Storage Association* (2018), o armazenamento hidráulico é uma das tecnologias de armazenamento mais comum e bem estabelecida nas diferentes regiões do mundo. Uma instalação de armazenamento hidráulico depende de uma queda de água a fim de gerar energia elétrica por meio de uma turbina e motor/gerador. Durante os períodos de alta demanda de eletricidade, a água armazenada é liberada para passar pela turbina, tal qual ocorre em uma hidrelétrica convencional. Já nos períodos de baixa demanda (períodos noturnos ou fins de semana, onde a energia também é mais barata), utilizam-se bombas para elevar a água

de volta ao reservatório, criando uma fonte de energia sob demanda que pode ser ativada rapidamente. Dessa forma, as instalações de armazenamento hidráulico se tornam diferentes das hidrelétricas convencionais, uma vez que são consumidoras líquidas de eletricidade na fase do bombeamento. Contudo, essas usinas são altamente eficientes, em termos de bombeamento e turbinamento, com eficiência em torno de 80%, e auxiliam no balanceamento de carga dentro do sistema elétrico. Um projeto de hidrelétrica reversível é, geralmente, projetado para ter de 6 a 20 horas de armazenamento no reservatório, para posterior operação. Se houver tarifas diferenciadas entre as horas de pico e horários de baixa demanda, essa tecnologia pode ser muito econômica e com potencial para fornecer serviços críticos de rede auxiliar (ESA, 2018).

O armazenamento hidráulico geralmente utiliza dois reservatórios: um superior e um outro inferior. Alguns projetos podem usar rios, lagos e até mesmo o oceano como reservatório inferior. Mas, segundo a ESA (2018), existem, além das usinas hidrelétricas reversíveis, mais 2 (dois) tipos de armazenamento hidráulico: usinas hidrelétricas reversíveis de subsuperfície e usinas hidrelétricas reversíveis com velocidade variável.

As usinas hidrelétricas reversíveis de subsuperfície utilizam o conceito de um ou ambos os reservatórios se localizarem abaixo do solo, onde cavernas e escavações subterrâneas abandonadas se tornam atraentes devido à disponibilidade do local e potencial redução dos impactos ambientais. Porém, os custos com os materiais e os riscos da construção dificultam tais projetos. Exemplo desses estudos é o *Elmhurst Quarry Pumped Storage Project (EQPS)*, localizado em Illinois, nos Estados Unidos. O conceito é utilizar uma mina e uma pedreira abandonadas como reservatório superior e inferior. A ideia seria desviar e alimentar, por gravidade, a água de uma fonte acima do solo em uma usina subterrânea, através do conjunto turbina-bomba. A energia gerada seria entregue à rede elétrica durante os períodos de pico. Uma vez por meio das turbinas, a água seria temporariamente armazenada em cavernas de minas abandonadas, antes de ser bombeada de volta à sua fonte original usando energia de baixo custo, nos períodos fora de pico. O EQPS tem uma capacidade inicial de projeto entre 50 MW e 250 MW, com um potencial estimado de 708,5 GWh de armazenamento de energia, além de ser importante no auxílio ao controle de inundações, pela geração renovável e pela proximidade com linhas de transmissão e grandes centros de carga (ESA, 2018).

As usinas hidrelétricas reversíveis com velocidade variável utilizam conjuntos de turbina-bomba com velocidade variável, o que permite que a turbina opere com eficiência máxima por mais tempo. Um dos principais benefícios dessa tecnologia é o ajuste da frequência da rede

elétrica para fornecer regulação e estabilidade de grade. Esta nova oportunidade de serviço auxiliar é necessária para lidar com as variações das energias limpas, como o vento, fornecendo uma faixa de operação maior e tempos de partida mais rápidos. Porém, a instalação de novos equipamentos de velocidade variável deve ser cuidadosamente estudada, e condições adequadas de mercado devem existir para tornar a tecnologia economicamente viável. Por isso, apesar das inúmeras vantagens, a maioria dos projetos de armazenamento bombeado em desenvolvimento no mundo continua sendo de turbinas-bomba de velocidade fixa (ESA, 2018).

2.3.7. Supercondutores

O princípio de funcionamento dos supercondutores baseia-se na capacidade que essa tecnologia apresenta para conduzir correntes de elevado valor com perdas mínimas, dando origem a campos magnéticos com grande capacidade de armazenamento de energia (COUTO, 2012). O sistema é composto por 3 componentes principais: uma bobina, um sistema de condicionamento de energia e um sistema de refrigeração. A bobina é feita de um material supercondutor, como por exemplo nióbio-titânio ou nióbio-estanho. Porém, esses materiais só se tornam supercondutores relevantes em temperaturas muito baixas, em torno dos -253°C . Portanto, é preciso um sistema para resfriar esses materiais, geralmente com hélio liquefeito, o que torna todo o processo muito caro e ainda diminui a eficiência. Novas pesquisas com resfriamento por nitrogênio líquido estão sendo conduzidas, o que reduziria os custos de forma satisfatória, porém torna os materiais muito frágeis e difíceis de processar (OBERHOFER, 2012).

Os supercondutores apresentam grandes vantagens em determinadas aplicações, sendo caracterizados por terem elevada rapidez de carga e descarga. A capacidade de armazenamento é bastante elevada, com quase nenhuma perda, elevando a eficiência dos supercondutores a mais de 90%. Densidade de potência e tempo de vida útil são também pontos fortes desta tecnologia, além de produzirem baixo impacto ambiental. Os pontos negativos são os altos custos de produção e manutenção, bem como a necessidade de resfriamento a temperaturas muito baixas (COUTO, 2012; OBERHOFER, 2012).

2.3.8. Hidrogênio

O hidrogênio é considerado uma fonte promissora e limpa de armazenamento de energia. Pode ser produzido ou extraído de materiais como o carvão, gás natural, biomassa, ou até mesmo a

água. O gás natural é, atualmente, o material mais utilizado para a extração do hidrogênio, sob a forma do metano. A aplicação do hidrogênio é vantajosa, podendo armazenar grandes quantidades de energia (COUTO, 2012).

A eletricidade pode ser convertida em hidrogênio através da eletrólise. O hidrogênio pode ser armazenado e eventualmente re-eletrificado, com uma eficiência de 30 a 40%, podendo chegar a 50% se forem desenvolvidas tecnologias mais eficientes. Apesar dessa baixa eficiência, o interesse no armazenamento de energia de hidrogênio é crescente, devido à capacidade de armazenamento muito maior comparada às baterias, em pequena escala, ou hidrelétricas bombeadas e CAES, em larga escala. Entretanto, a tecnologia do hidrogênio ainda está longe dos resultados desejáveis, em termos de rendimento, na casa dos 35%, e custos de investimento, além de que, para aplicações de potência de rede, o seu tempo de vida útil é ainda limitado (ESA, 2018).

2.3.9. Comparativo entre as tecnologias de armazenamento de energia

A fim de traçar uma comparação entre as tecnologias de armazenamento apresentadas nesta revisão bibliográfica, além de ilustrar melhor todas as informações já mencionadas, foi construída a Tabela 1, onde se faz um resumo de todas as vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

Tabela 1 - Comparação entre as tecnologias de armazenamento apresentadas (FONTE: elaborado pela autora)

	Vantagens	Desvantagens
Baterias de estado sólido	Resposta rápida; Modularização; Altamente comercializável; Pouca manutenção; Maturidade tecnológica;	Pouco tempo de vida útil; Impacto ambiental; Altos custos;
Baterias de fluxo	Variadas aplicações; Maior capacidade de armazenamento do que as baterias de estado sólido;	Altos custos de manutenção; Volume elevado; Impacto ambiental;

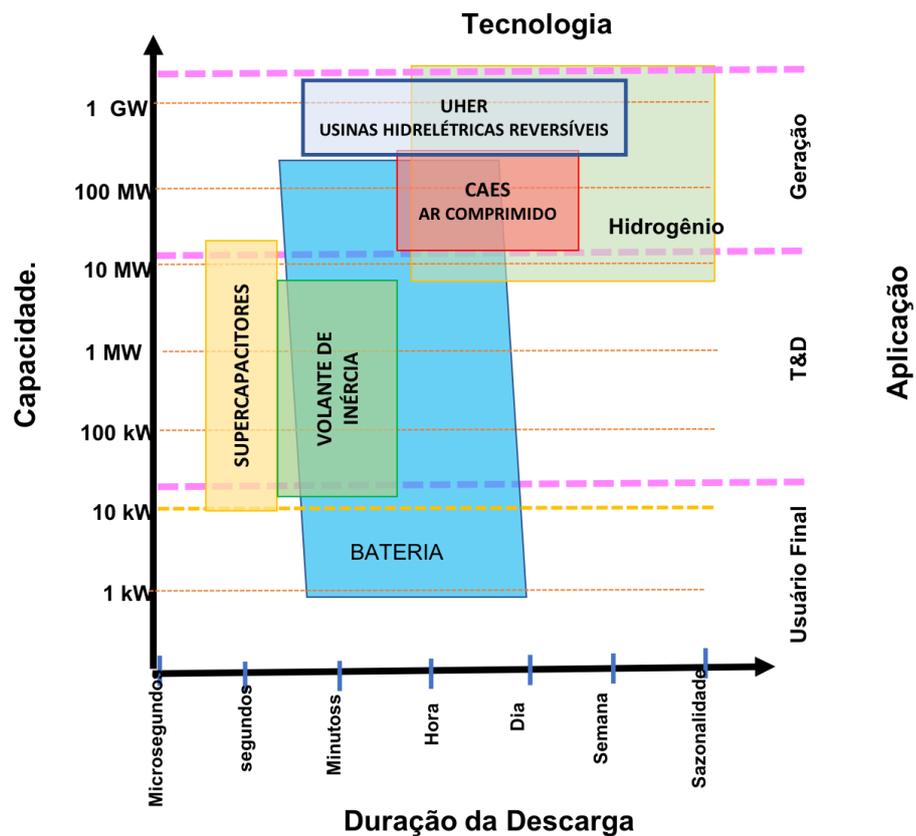
Tabela 1 - Comparação entre as tecnologias de armazenamento apresentadas (FONTE: elaborado pela autora)

Volantes de Inércia	Ambientalmente amigável; Vários ciclos de carga e descarga; Grande aplicabilidade; Baixa manutenção; Longo tempo de vida útil;	Alto custo inicial; Baixa densidade de energia; Pequena capacidade de armazenamento;
CAES	Utilizável em larga escala; Em locais adequados, não requer instalações enormes e caras; Emite quantidades menores de gases de efeito estufa do que plantas convencionais;	Dependência geológica para instalação do sistema;
Armazenamento Térmico	Utiliza materiais abundantes com menos toxicidade que as baterias; Maior ciclo de vida e tempo de vida útil do que as baterias;	Alto custo; Não adequado para armazenar energia proveniente de fontes como a energia eólica;
Armazenamento Hidráulico	Utilizável em larga escala; Pouca manutenção; Maturidade tecnológica; Maior vida útil; Maior estabilidade; Resposta rápida; Alta capacidade de armazenamento;	Restrições geológicas; Custo de capital elevado; Impacto ambiental;
Supercondutores	Rápido tempo de resposta; Alta capacidade de armazenamento;	Altos custos de produção e manutenção;

Tabela 1 - Comparação entre as tecnologias de armazenamento apresentadas (FONTE: elaborado pela autora)

	Alto tempo de vida útil; Baixo impacto ambiental;	Eficiência reduzida pela necessidade de refrigeração;
Hidrogênio	Baixo impacto ambiental; Energia limpa; Alta capacidade de armazenamento;	Tempo de vida útil limitado; Altos custos; Baixa eficiência;

A Figura 2, a seguir, mostra a relação entre a duração do tempo de descarga e a capacidade de armazenamento de cada tecnologia:



T&D = Tecnologia e Desenvolvimento

Figura 2- Duração da descarga X Capacidade de armazenamento (FONTE: IEA, 2014 *apud* BELLIDO, 2016)

Pela Figura 2 é possível verificar que a tecnologia das UHRs mostra-se tanto como uma das opções que demonstra maiores capacidades de potência instalada como de energia gerada, apresentando a versatilidade de fornecer energia por várias horas, dias e até mesmo semanas. Depois das UHRs, o sistema CAES e o hidrogênio também mostram-se competitivos, em nível comercial, para grandes aplicações.

Já a Figura 3 ilustra as eficiências atingidas por cada tecnologia, em termos de armazenamento e conversão em energia elétrica. Por ela, pode-se perceber que os volantes de inércia, supercondutores e baterias demonstram grandes eficiências, em torno de 90%. Porém, a eficiência em si não pode ser considerada um indicador de tecnologias adequadas para os sistemas energéticos, uma vez que cada sistema possui suas peculiaridades, e os custos, recursos necessários e tamanho da aplicação também devem ser levados em consideração (OBERHOFER, 2012).

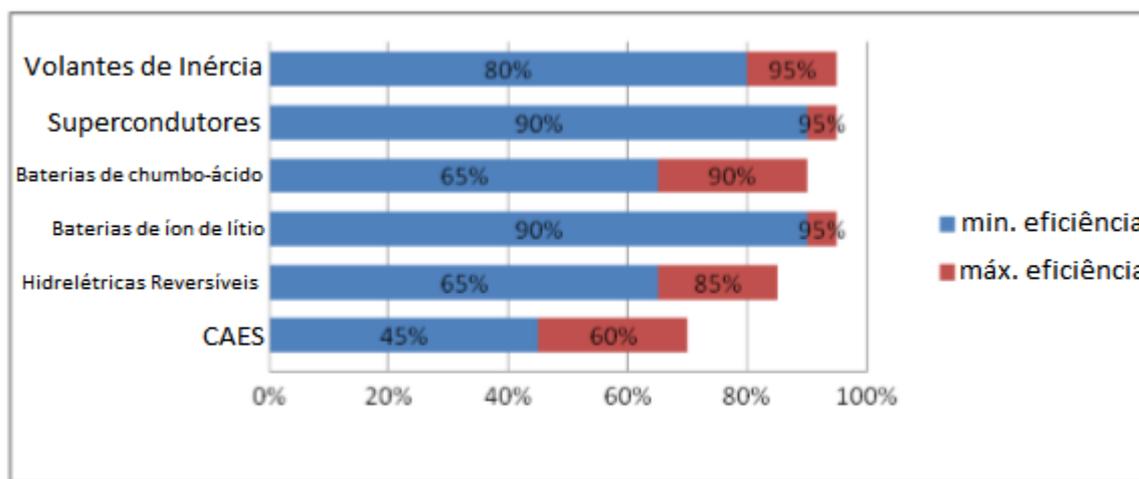


Figura 3 - Eficiências de cada tecnologia de armazenamento (FONTE: OBERHOFER, 2012)

A Tabela 2 mostra as perdas de energia para cada tecnologia de armazenamento. Pode-se notar que os desempenhos são elevados, no geral. Apenas os volantes de inércia e os supercondutores demonstram perdas mais significativas por dia, enquanto que as baterias de íon de lítio se encontram no extremo oposto, com apenas 5% de perdas por ano.

Tabela 2 - Comparação entre as perdas de energia para as diferentes tecnologias de armazenamento

(FONTE: Adaptado de OBERHOFER, 2012)

Volantes de Inércia	Supercondutores	Bateria Chumbo-ácido	Bateria de íon de Lítio	Usina Hidrelétrica Reversível	CAES
~70% por dia	10–12% por dia	~0,17% por dia	~0,014% por dia	0–0,5% por dia	0–10% por dia

A Figura 4 mostra a maturidade das diversas tecnologias de armazenamento existentes, também enquadrando-as em suas etapas de desenvolvimento (fases de pesquisa, demonstração e comercialização). Pode-se perceber que, dentre todas as tecnologias disponíveis, as usinas hidrelétricas reversíveis, denominadas na figura como bombeamento hidráulico, constituem-se como a forma de armazenamento mais madura já em nível comercial, o que se constitui em grande vantagem frente às demais fontes. Em comparação com outros sistemas de armazenamento de larga escala, como os bancos de baterias e o sistema CAES, o investimento nas UHRs é menor, com maior vida útil (em torno de 50 a 100 anos) e maior estabilidade. Com isso, as UHRs são consideradas as melhores ferramentas de armazenamento de energia em grande escala, sendo a tecnologia mais madura e prática, atualmente (KONG et al, 2017).

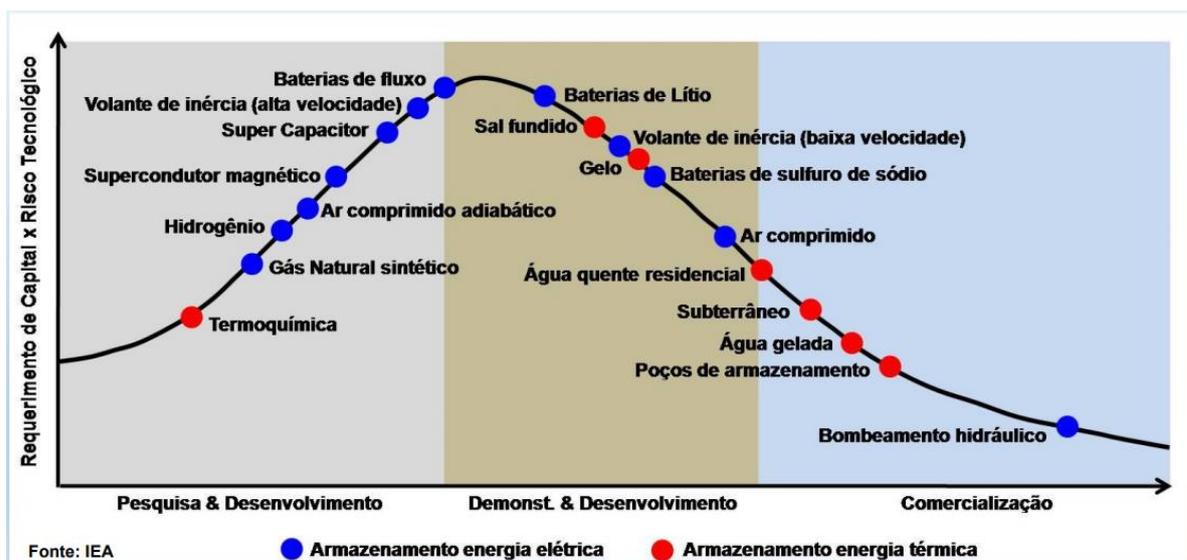


Figura 4 - Maturidade das tecnologias de armazenamento de energia. (FONTE: IEA, 2014 *apud* BELLIDO, 2016)

Por fim, na Figura 5, é possível verificar que, dentre as tecnologias de armazenamento disponíveis, as usinas hidrelétricas reversíveis respondem por 99,3% da capacidade de armazenamento em todo o mundo:

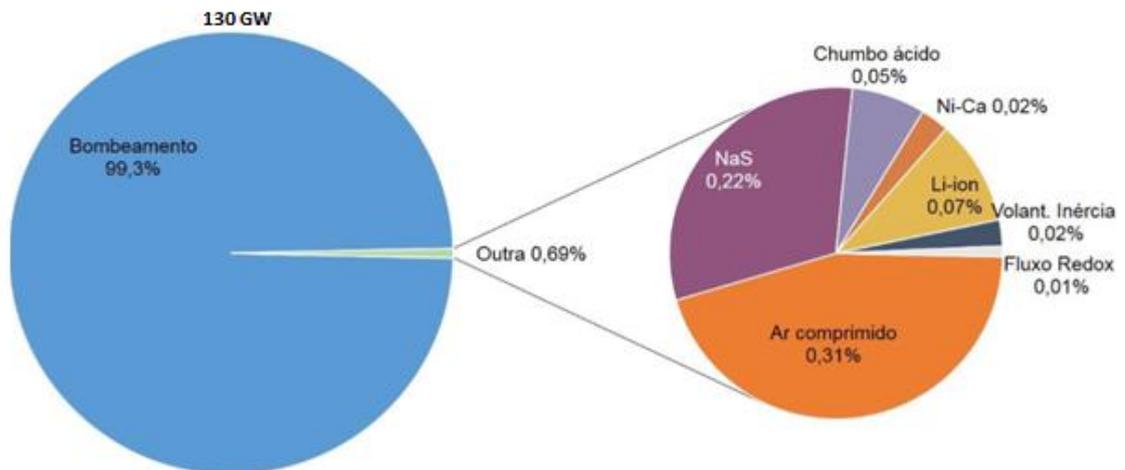


Figura 5 - Capacidade armazenada no mundo. (FONTE: Adaptado de IEA, 2014 *apud* BELLIDO, 2016)

3. USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS

Este capítulo é dedicado a apresentar um panorama da capacidade instalada de usinas hidrelétricas reversíveis pelo mundo, além da perspectiva brasileira para inserção deste tipo de empreendimento. Além disso, serão apresentadas as características das UHRs e seus benefícios, bem como seus impactos ambientais, que foram identificados por meio de uma extensa revisão bibliográfica em trabalhos e artigos disponíveis na literatura nacional e internacional, acerca de propostas de projetos de UHRs e de empreendimentos já concretos instalados em diversos países.

3.1. Capacidade instalada no mundo

O aproveitamento do potencial hidráulico por meio das usinas reversíveis surgiu por volta de 1890, na Europa. Já na década de 1930, as usinas reversíveis estavam amplamente disseminadas pelo globo, conquistando seu ápice de construção no período entre 1960 e 1980. Atualmente, a potência das usinas reversíveis no mundo chega a 127 GW, sendo o Japão o país que detém a maior capacidade instalada, com 25 GW, seguido pela China e Estados Unidos (COUTO, 2012; CANALES et al, 2015, VASCONCELOS, 2015), como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Capacidade instalada de usinas reversíveis, por país, em 2014.

(FONTE: Adaptado de BARBOUR et al, 2016)

País	Capacidade Instalada de UHRs (GW)	Em construção (GW)
Japão	24,5	3,3
China	22,6	11,6
Estados Unidos	20,5	-
Itália	7,1	-
Espanha	6,8	-
Alemanha	6,3	-
França	5,8	-
Índia	5,0	1,7
Áustria	4,8	0,2
Reino Unido	2,7	-

Tabela 3 - Capacidade instalada de usinas reversíveis, por país, em 2014.

(FONTE: Adaptado de BARBOUR et al, 2016)

País	Capacidade Instalada de UHRs (GW)	Em construção (GW)
Suíça	2,5	2,1
Portugal	1,1	1,5
TOTAL	109,7	20,4

Para se ter uma ideia do uso dessa tecnologia ao longo do tempo, a Figura 6 mostra a evolução da capacidade instalada das usinas reversíveis nos Estados Unidos. O desenvolvimento das UHRs permaneceu lento até os anos 1960, quando as empresas estadunidenses começaram a considerar a energia nuclear. Como a produção nuclear não pode ser aumentada ou diminuída rapidamente para atender às demandas flutuantes, as usinas reversíveis foram ganhando destaque pela importância na complementaridade com a energia nuclear, a fim de fornecer energia de pico (YANG & JACKSON, 2011).

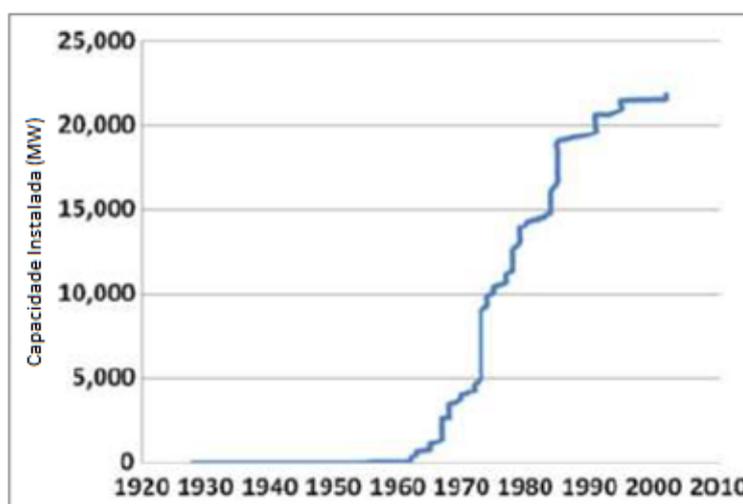


Figura 6 - Evolução da capacidade instalada de UHRs nos EUA. (FONTE: Adaptado de YANG & JACKSON, 2011)

3.2. Perspectivas para as usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil

Para se traçar um panorama do futuro das usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, é preciso, primeiramente, considerar o cenário energético do país. O Brasil é conhecido pela sua vasta riqueza hídrica e, também, por utilizar majoritariamente a hidroeletricidade como principal fonte de sua matriz elétrica, como mostra a Figura 7.

Devido ao tamanho de seu potencial hidráulico e das usinas já existente no país, é natural que se queira utilizar as hidrelétricas como forma de garantir a continuidade do abastecimento energético, aliadas ao conceito renascente de armazenamento via usinas hidrelétricas reversíveis. Junto a esse crescente cenário, tem-se a necessidade cada vez maior de garantir a confiabilidade do sistema elétrico pelos próximos anos, principalmente pelo fato de que, pelas projeções realizadas desse setor, a demanda por energia continuará aumentando, o que acarretará em um enorme risco de déficit de potência (PDE, 2017), como mostra a Figura 8.

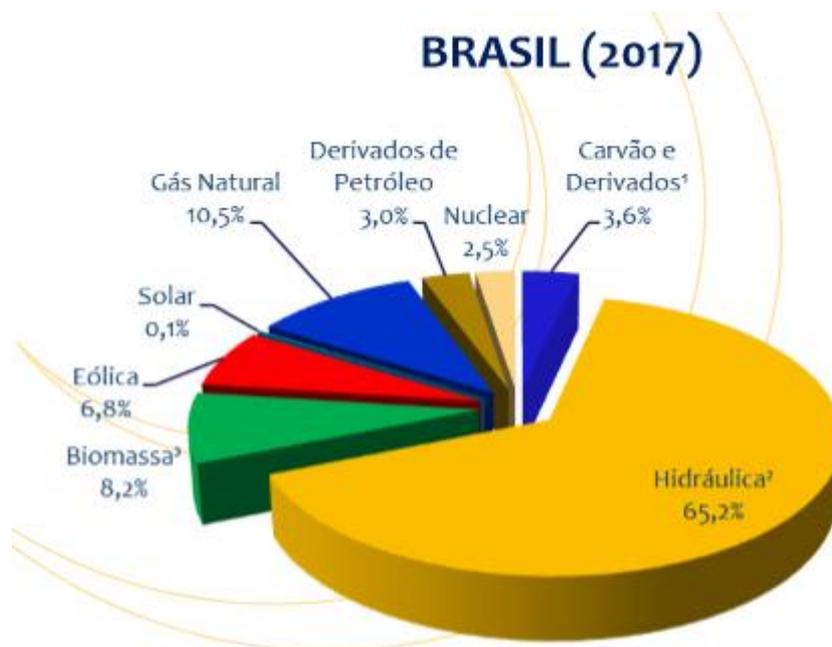


Figura 7 - Matriz elétrica brasileira no ano de 2017 (FONTE: BEN, 2018)

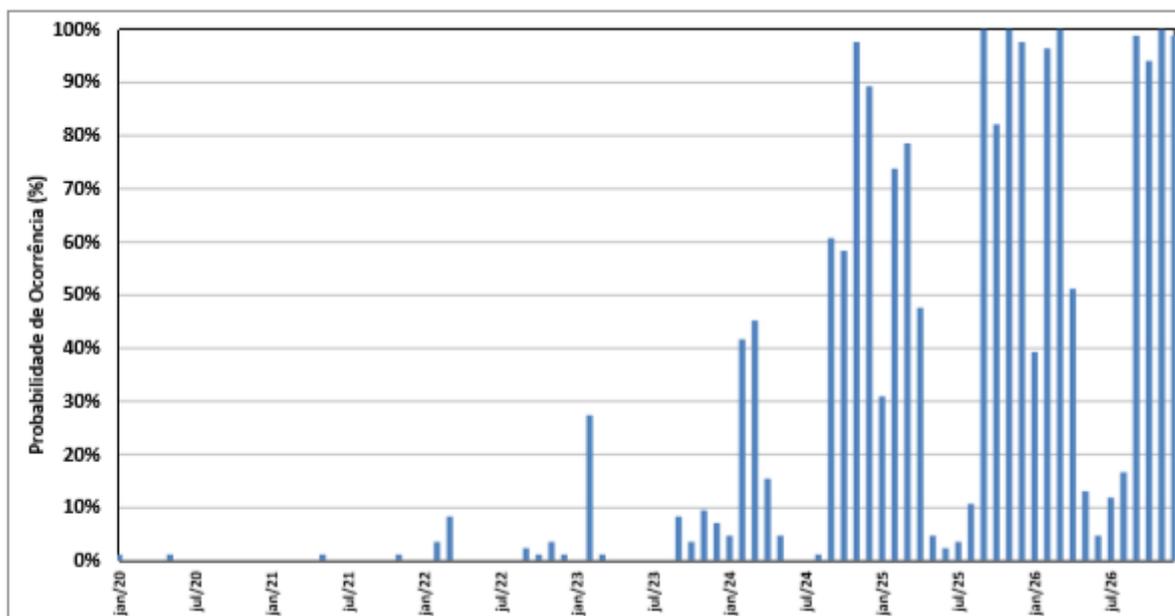
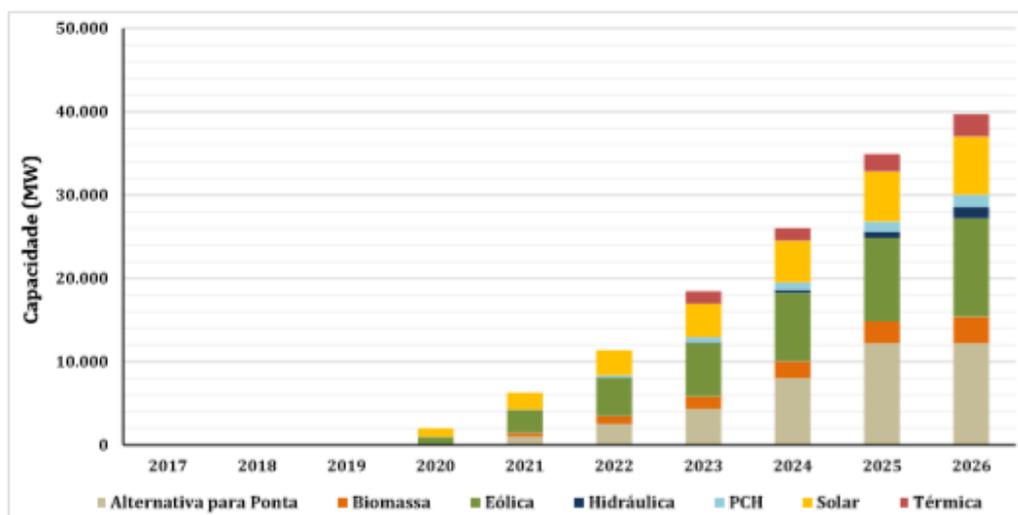


Figura 8 - Risco de déficit de potência no SIN até 2026 (FONTE: PDE, 2017)

O risco de déficit de potência tende a ser maior nos momentos de menor disponibilidade hidráulica, e não nos de maiores demandas por energia (PDE, 2017). Juntamente a esse maior risco, está o crescimento das fontes intermitentes (eólica e solar), que apesar de seus benefícios ao meio ambiente, por serem renováveis e limpas, trazem riscos ao Sistema Interligado Nacional (SIN) pela sua intermitência, o que diminui a confiabilidade da entrega de energia. Esse crescimento pode ser visto na Figura 9, onde são apresentados os dados previstos da expansão das fontes energéticas até 2026. Pela figura pode-se perceber o aumento significativo das fontes eólica e solar, porém já é possível perceber um aumento também significativo da chamada “alternativa para ponta”, que engloba sistemas de armazenamento, como baterias e as usinas reversíveis. Por isso, nota-se que o governo brasileiro já dá mostras de sua preocupação para com a oferta de energia nos próximos anos e na implantação dos sistemas de armazenamento no país (PDE, 2017).



Fontes	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Alternativa Ponta	0	0	0	0	994	2.532	4.334	8.002	12.198	12.198
Hidráulica	0	0	0	0	0	0	118	351	787	1.317
PCH+EOL+BIO+SOL	0	0	0	2.000	5.271	8.843	12.514	16.187	19.857	23.529
Térmica	0	0	0	0	0	0	1.500	1.500	2.084	2.667

Nota: O montante apresentado como PCH inclui também as CGH existentes.

Figura 9 - Projeção de crescimento das fontes de energia até 2026 (FONTE: PDE, 2017)

Estudos elaborados nas décadas de 1970 e 1980 indicam que o Brasil possui elevado potencial para aproveitamento e desenvolvimento de usinas hidrelétricas reversíveis. Esses estudos estão retomando sua visibilidade, como pode ser visto no documento realizado em 2016 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), intitulado “Usinas Reversíveis: Perspectivas no Setor Elétrico Brasileiro”, apresentado no X Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas e Usinas Reversíveis (FERREIRA, 2016). Neste documento, são prospectados os potenciais de usinas reversíveis para cada região do Brasil, onde o destaque fica para a região Sudeste, com 385 sítios, localizados principalmente na Serra da Mantiqueira, Serra do Mar e Serra do Castelo. Porém, este é um trabalho teórico, em que não foram levadas em consideração as condições geológicas dos locais, o que poderia reduzir o número de sítios disponíveis (FERREIRA, 2016). As principais dificuldades levantadas pela EPE (FERREIRA, 2016) são as premissas desatualizadas dos estudos, devido ao fato de serem antigos e possuírem apenas caráter

preliminar. Além disso, a maioria dos locais prospectados pelos estudos apresentam interferência com áreas de proteção ambiental.

Os principais desafios apontados pela EPE (FERREIRA, 2016) para o desenvolvimento das usinas reversíveis no Brasil são: definição do regime de operação, como número de ciclos de geração e bombeamento; definição da regulamentação tarifária, a fim de tornar a usina reversível competitiva dentro do mercado; e definição de uma regulamentação ambiental, para avaliar corretamente os impactos das UHRs e poder desenvolver seus projetos de maneira sustentável.

3.3. Características das UHRs

Como já comentado anteriormente, usinas hidrelétricas reversíveis são um tipo versátil de hidrelétricas, compostas por dois reservatórios. Durante o período diurno, período de maior consumo energético, a UHR usa a água do reservatório superior para gerar energia elétrica e a armazena no reservatório inferior. Durante a noite, quando o consumo energético é menor, a UHR bombeia de volta a água armazenada no reservatório inferior para o reservatório superior, estabelecendo uma espécie de circuito fechado, que reaproveita continuamente a água (VASCONCELOS, 2015). A Figura 10 mostra o esquema operacional de uma usina hidrelétrica reversível.

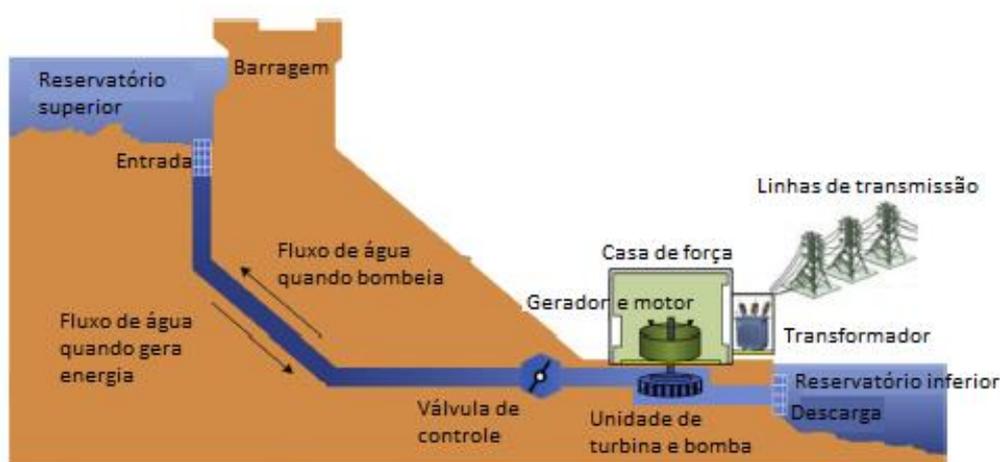


Figura 10 - Esquematização de uma usina reversível (FONTE: Adaptado de LUO et al, 2015)

As características técnicas das usinas hidrelétricas reversíveis podem ser resumidas na definição de que esses empreendimentos não são apenas pontos de fornecimento de energia, mas também ferramentas de operação da rede elétrica (KONG et al, 2017). Uma UHR pode funcionar tanto como fonte de carga quanto como fonte de energia. A unidade de armazenamento reversível é usada como bomba, consumindo energia nas horas de demanda baixa, ou como gerador, gerando energia nas horas de pico, e essa característica nenhuma outra tecnologia de usina possui (KONG et al, 2017).

Segundo Pasten & Santamarina (2011), quanto maior o desnível entre os dois reservatórios e quanto maior a vazão, mais energia será armazenada. O planejamento dos reservatórios é o elemento mais crítico de uma usina reversível, e sua construção, segundo Schreiber (1978, *apud* CANALES et al, 2015), pode ser de duas formas: a primeira são as usinas de circuito fechado, ou também chamadas “usinas de bombeamento puro”. São usinas independentes do rio, onde o fluxo de água transita entre os dois reservatórios e, eventualmente, é necessário um fluxo adicional para repor as perdas por evaporação e infiltração; a segunda forma são usinas de circuito aberto ou semi-aberto, onde os reservatórios são construídos no leito do rio, sendo utilizados como usinas hidrelétricas convencionais durante o dia, e à noite utilizando o excedente de energias renováveis para o bombeamento (CANALES et al, 2015), como ilustra a Figura 11:



Figura 11 – Projeto da UHR Ludington, nos Estados Unidos, de circuito aberto (à esquerda); UHR Goldisthal, na Alemanha, de circuito semi-aberto (centro) e UHR Limberg II, na Áustria, de circuito fechado (à direita). (FONTE: TIAGO FILHO, 2016)

Segundo Hunt (2016), as usinas reversíveis podem se enquadrar nas seguintes denominações:

- Usina Reversível de Ciclo Plurianual: são usinas que consomem, no bombeamento, a energia secundária anual excedente no sistema hidráulico. Por sua vez, geram ou turbinam energia primária para suprir épocas de estiagem, no período crítico plurianual;
- Usina Reversível de Ciclo Sazonal: são usinas que geram energia primária todos os anos, de forma contínua, por diversos meses. Consomem energia secundária excedente de origem hidráulica ou térmica, nos períodos de chuvas;
- Usina Reversível de Ciclo Semanal: gera energia primária de ponta, contínua durante algumas horas do dia ou da semana. Consomem energia secundária excedente nos fins de semana; e
- Usina Reversível de Ciclo Diário: gera energia primária de ponta para atender picos no sistema. Consome energia secundária de origem hidráulica ou térmica, excedente nas horas de menor demanda diária.

De acordo com Venneman et al (2010), as quedas de bombas reversíveis variam entre 100 e 800 metros. A potência de saída das turbinas varia entre 10 e 500 MW, não sendo necessários elevados níveis de qualidade da água, podendo operar até mesmo no mar. Aproximadamente 70 a 85% da energia elétrica usada para bombear a água ao reservatório superior é recuperada no estágio de geração (PASTEN & SANTAMARINA, 2011), como pode ser observado na Figura 12.

Como usinas hidrelétricas reversíveis são instalações que operam gerando ou consumindo energia, o balanço energético é sempre negativo, ou seja, esse tipo de usina, de forma geral, tem um consumo maior que a geração. Dessa forma, fica a questão de como viabilizar um empreendimento que se comporta mais como consumidor de energia do que como gerador. O fato é que um sistema elétrico precisa mais do que apenas energia. São necessários recursos elétricos para que essa energia seja disponibilizada com qualidade e confiabilidade, diversidade de fontes para sustentabilidade, reforço de potência e controle de reativos. É justamente para oferecer esse equilíbrio ao sistema que a UHR surge como alternativa (SIL, 2017).

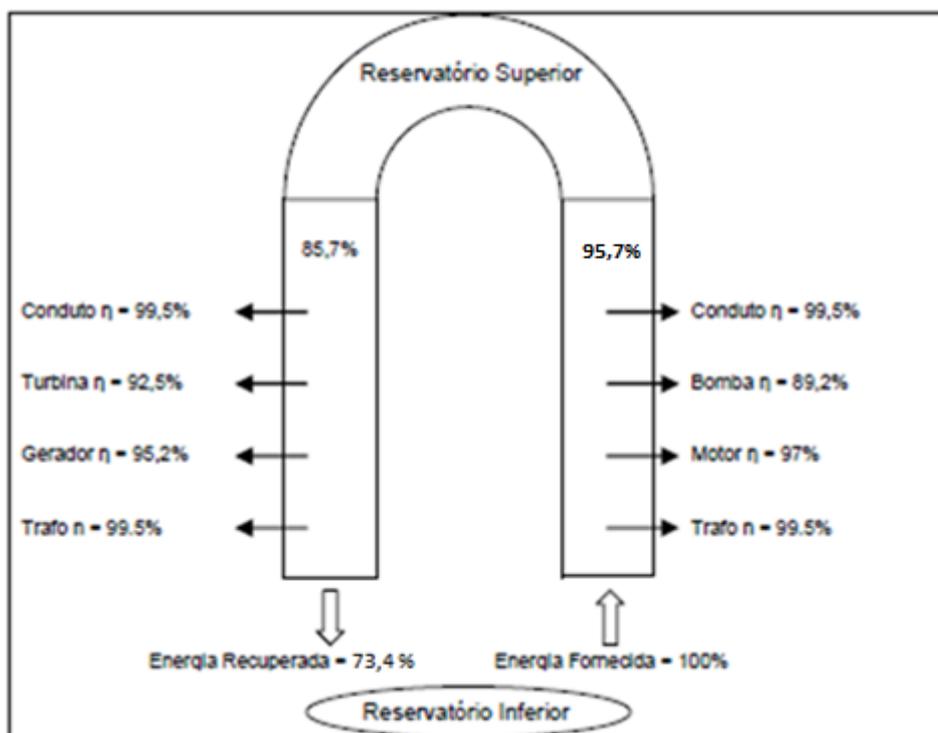


Figura 12 - Energia recuperada em uma UHR (FONTE: Adaptado de SOUZA, 1980 *apud* ZUCULIN et al, 2014)

3.4. Benefícios das UHRs

Os benefícios do armazenamento de energia elétrica são bastante conhecidos. Em se tratando especificamente de Usinas Hidrelétricas Reversíveis, de acordo com Zuculin et al (2014), tem-se:

- a) Suporte à penetração de energias renováveis, em especial, as fontes eólica e solar;
- b) Confiabilidade e qualidade do suprimento de energia, uma vez que o estoque de energia disponível na usina reversível pode ser usado prontamente em ocasiões de contingências;
- c) Controle de potência reativa, correção do fator de potência e controle de tensão, uma vez que a usina reversível pode ser usada tanto para prover rapidamente potência ativa, como potência reativa na rede;
- d) Alavancagem da carga, acarretando melhoria do fator de carga, adiamento da expansão da geração (por meio da melhor utilização da capacidade instalada) e redução do custo de aquisição de energia no horário de ponta;

- e) Acompanhamento da carga, já que a usina reversível tem a propriedade de fazer com que a geração acompanhe a variação da carga de maneira gradual, contínua, podendo também ter variações mais abruptas, caso seja necessário;
- f) Redução das necessidades de reserva girante, devido à habilidade de despacho rápido, podendo agir em substituição à reserva girante convencional;
- g) Adiamento da expansão da transmissão, pois usinas reversíveis bem localizadas podem ser acionadas, reduzindo o carregamento de linhas de transmissão nos horários de pico;
- h) Adiamento da capacidade de geração, pois usinas reversíveis podem reduzir e/ou atender às demandas de pico, adiando a ampliação da capacidade instalada de geração;
- i) Suporte à geração distribuída na rede, já que tendo a usina reversível como back-up, a microgeração e/ou cogeração distribuída poderão trabalhar com mais confiabilidade e poderão operar de forma constante nos seus pontos de máxima eficiência;
- j) Estabilidade do sistema de potência, uma vez que as oscilações de voltagem e frequência podem ser mais bem controladas com suporte das usinas reversíveis;
- k) Controle automático da geração, pois a disponibilidade de armazenamento para uso na ponta pode minimizar erros do controle automático em determinadas áreas;
- l) Redução de combustível da geração térmica, uma vez que a usina reversível viabiliza o uso em base permanente das unidades mais econômicas de geração térmica. Adicionalmente, com a melhoria do fator de potência, as perdas são reduzidas e, então, há uma redução concomitante do uso de energia;
- m) Benefícios ambientais, pois a diminuição no uso de combustíveis fósseis é um benefício ambiental ocasionado pelas usinas reversíveis;
- n) Aumento de eficiência e redução da manutenção em unidades de geração, uma vez que a utilização da geração da usina reversível para atendimento da carga máxima permite reduzir alternâncias de geração das usinas térmicas, que então operam de forma mais regular, com maior eficiência e menor necessidade de manutenção.

Além de todos os benefícios supracitados, algumas UHRs conseguem passar da etapa de bombeamento à geração máxima de energia em apenas 2 minutos, e em condições de *stand by* para carga máxima em apenas 12 segundos. Tal vantagem pode trazer inúmeros benefícios

quando da instalação dessas usinas próximas aos centros de consumo, pois evita o investimento em linhas de transmissão e, conseqüentemente, reduz as perdas de energia (ZUCULIN et al, 2014, CANALES et al, 2015).

Outras vantagens também são comentadas por Hunt & Adelaide (2016), como, por exemplo, aumentar a capacidade de armazenamento energético do Brasil; viabilizar a construção de novas hidrelétricas em cascatas; aumentar a eficiência de armazenamento do país; reduzir custos de transmissão de UHEs na Amazônia e viabilizar a construção de novas usinas na Bacia Amazônica. Além disso, a relação entre área alagada e energia armazenada nas UHRs é mais favorável. Essas usinas também conseguem aumentar a disponibilidade hídrica para os usos múltiplos da água e contribuem para descentralizar o armazenamento energético do Brasil, que hoje se concentra predominantemente no Sudeste, trazendo maior segurança energética.

A incorporação de UHRs no SIN pode trazer uma série de benefícios ao sistema energético brasileiro, devido a sua capacidade de gerar potência complementar, de atender à demanda de ponta e de otimizar o uso do sistema de transmissão. Adicionalmente, a operação de UHRs sazonais apresenta, além das vantagens já mencionadas, a capacidade de regularização da cascata local e a redução de vertimentos à jusante e vertimentos turbináveis em cascatas remotas. Nestes termos, as UHRs podem contribuir de forma direta e eficiente para o equilíbrio dinâmico entre a carga e a geração do SIN. É válido enfatizar, também, que esta modalidade de usina é considerada uma opção ambientalmente sustentável, à medida que contribui para a redução de impactos ambientais, por meio do uso de pequenas áreas de alagamento e do arrefecimento de emissões de gases de efeito estufa (CASTRO et al, 2018).

Em comparação com outras usinas, como a nuclear e a usina à carvão, as usinas reversíveis também apresentam mais vantagens, como mostra a Tabela 4:

Tabela 4 - Características e benefícios das UHRs comparadas a outras tecnologias

(FONTE: Adaptado de Zuculin et al, 2014)

Características	Usina Nuclear	Usina a carvão	Usina a óleo combustível	Usina a gás	Usina Reversível
Ciclo de trabalho	Base da carga	Base da carga	Base-carga média	Pico da carga	Pico-carga médio

Tabela 4 - Características e benefícios das UHRs comparadas a outras tecnologias

(FONTE: Adaptado de Zuculin et al, 2014)

Unidade de inicialização diária	Não é necessária	Não é necessária	Necessária para aquecer o óleo	Sim	Sim
Acompanhamento da carga	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Inicialização rápida (10 minutos)	Não	Não	Não	Sim	Sim
Regulação de frequência	Não	Sim	Sim	Não	Sim

Apesar das reconhecidas vantagens, ainda se tem como ponto negativo fazer a valoração econômica dos benefícios das UHRs, dificultando estabelecer uma normatização ou embasamento regulatório. O custo de capital ainda é elevado, em razão dos custos com licenciamentos, segurança, eficiência dos projetos e atrasos de construção, muitas vezes devido a problemas técnicos ou dificuldades de financiamento (ZUCULIN et al, 2014).

Além disso, a carência de regulação para contratação e remuneração dos investimentos necessários à viabilização das UHRs se constituem como entraves para a implementação destes projetos no Brasil. Ademais, o balanço energético negativo destes sistemas se constitui, historicamente, como um motivo de resistência à incorporação desta tecnologia em escala nacional. Entretanto, nos últimos anos, este posicionamento vem mudando diante da presença de um novo paradigma para o setor energético (CASTRO et al, 2018).

3.5. Os impactos ambientais das UHRs

Em função da similaridade na construção dos reservatórios, os impactos ambientais das usinas reversíveis são muito próximos aos de uma usina hidrelétrica convencional, como alteração na vazão, alargamento do leito do rio, impactos na flora e fauna, impactos socioeconômicos, entre outros (CANALES, 2015). Assim como nas hidrelétricas, a construção das usinas reversíveis gera poucas consequências negativas, de modo geral. As UHRs não poluem o ar, geram perdas

pequenas de recursos da terra e melhoram a capacidade de autodepuração do reservatório (DMITRIEVA et al, 1992). Além disso, o impacto das hidrelétricas se observa apenas em nível local, sendo possível realizar medidas mitigadoras para reduzir os danos ao meio ambiente, tornando-os toleráveis, tendo em vista os benefícios desse tipo de energia (QUEIROZ et al, 2013), o que se aplica também às UHRs.

Contudo, segundo Zuculin et al (2014), pode-se considerar que os impactos de uma UHR são menores que de uma UHE convencional, pois:

- A área alagada é menor;
- Depois de os reservatórios estarem prontos e cheios, a influência no regime fluvial será mínima, não havendo interferência na ictiofauna;
- A emissão de CO_{2eq} é menor, devido ao tamanho reduzido dos reservatórios;
- A UHR pode ser construída próxima ao centro de carga, o que diminui as perdas por transmissão e proporciona um melhor aproveitamento da energia. Ou seja, a UHR vai de encontro com o conceito de eficiência energética.

Comparada com os impactos ambientais e sociais da maioria das usinas hidrelétricas convencionais, a transformação de um reservatório em uma usina reversível proporciona um impacto ambiental e social muito menor (ARÁNTGUI et al, 2012).

Os impactos ambientais gerais das usinas hidrelétricas reversíveis dependem da seleção do local, forma e tamanho do reservatório, regime operacional e medidas mitigatórias. Esses impactos podem ser limitados, mas devem ser avaliados caso a caso, com levantamentos detalhados, e com a inclusão de aspectos sociais e políticos (PRASAD et al, 2013). Os impactos ambientais das UHRs também estão intimamente ligados à sensibilidade do meio em que o empreendimento será inserido. A presença de uma UHR acarretará em impactos maiores em ecossistemas mais sensíveis, enquanto que ecossistemas já modificados responderão com impactos menores (MOROZ et al, 2013).

3.5.1. Impactos ao meio físico

Um dos principais aspectos inerentes às UHRs é com relação aos reservatórios. Sempre haverá necessidade de dois reservatórios (inferior e superior), porém, consideravelmente pequenos em relação aos reservatórios tradicionais de hidrelétricas (ZUCULIN et al, 2014). Um trabalho conduzido por Harris, em 1992, discutiu que os impactos de reservatórios de usinas reversíveis

seriam um ponto negativo, uma vez que a área alagada seria maior, pelo fato de serem 2 reservatórios (HARRIS, 1992). Hoje, já se considera esse impacto como positivo, pois mesmo sendo 2 reservatórios, a área alagada ainda é menor do que em hidrelétricas convencionais. A exemplo do estudo de caso conduzido por Zuculin et al (2014), uma UHR com cerca de 800 MW de potência instalada e geração de 8 horas diárias em seis dias por semana, seria necessário um reservatório de menos de 10 hm³. Em contrapartida, a UHE Três Irmãos, em São Paulo, possui 808 MW instalados e um reservatório de cerca de 13.500 hm³. Essa diferença de tamanhos muda radicalmente a análise dos impactos socioambientais de uma UHR, pois enquanto na UHE convencional o reservatório é projetado para criar ou concentrar a queda de um rio, na UHR a queda é o próprio desnível natural abrupto de uma serra, ficando o reservatório apenas para conter o volume de geração e bombeamento.

Por outro lado, o tamanho reduzido dos reservatórios fará com que eles sofram variações mais rápidas e frequentes em seus níveis de água (BAKKEN, 2011; KEAR & CHAPMAN, 2013; ZUCULIN et al, 2014). Um reservatório de uma hidrelétrica convencional terá flutuações em seu nível de água em longo prazo, de forma sazonal ou anual. Por outro lado, um reservatório para fins de armazenamento precisará lidar com flutuações mais frequentes, em curto prazo, de forma semanal, diária ou até mesmo horária (PATOCKA, 2014). As maiores variações do nível de água dos reservatórios reduz a zona litorânea permanentemente molhada. Usinas reversíveis apresentam um grande volume de água transitando de um reservatório para o outro, o que pode ocorrer dentro de períodos de tempo variados e rápidos, dependendo da demanda de energia, quando a usina passará de bombeamento à geração e vice-versa. Esse comportamento leva a reduções de curto prazo na zona litorânea permanentemente molhada do reservatório, cuja frequente exposição pode gerar odores desagradáveis devido à presença de matéria orgânica em decomposição. Um fator determinante será a morfologia do reservatório, pois aqueles em locais íngremes terão pequenas reduções da área molhada, enquanto que locais com declividade mais amena serão mais afetados (PATOCKA, 2014). Uma alternativa para mitigar esse impacto é, então, justamente a criação de reservatórios com laterais íngremes, para reduzir a perda da zona litorânea e diminuir o risco de erosão nas encostas (PRASAD et al, 2013).

As constantes variações dos níveis da água também afetam a estabilidade dos bancos, ou taludes, dos reservatórios ao longo do tempo, seja por variação da pressão da água ou pela erosão (BAKKEN, 2011). À medida que essas variações se tornam mais rápidas e frequentes, pela característica das usinas reversíveis, aumenta a instabilidade dos bancos do reservatório.

Estudos revelam que taxas rápidas de retiradas ocasionam 60% dos deslizamentos de terra (QUANHUA, 2012 *apud* PATOCKA, 2014). A estabilidade desses bancos é fundamental para impedir a erosão e a sedimentação no reservatório, garantindo maior proteção de sua estrutura e do meio ambiente. Um estudo realizado por Mariano (2017) levantou os principais condicionantes geotécnicos em usinas reversíveis, e identificou que o rebaixamento rápido dos níveis da água é uma condição crítica a que taludes de barragens possivelmente estarão sujeitos nesse tipo de empreendimento, em razão dos ciclos operativos curtos, diários ou semanais, envolvendo esvaziamentos e reenchimentos sucessivos dos dois reservatórios. O estudo discutiu as consequências da ocorrência de rupturas sucessivas em margens de reservatórios de hidrelétricas reversíveis, demonstrando que essas rupturas afetam a geração de energia elétrica em decorrência do assoreamento, bem como colocam em risco a segurança de demais estruturas, como barragens e vertedores, pela geração de ondas no reservatório. Além disso, podem ter reflexo nas condições ambientais e sociais de populações ribeirinhas.

Usinas reversíveis possuem pouca interferência no regime fluvial de uma bacia. Uma vez que um dos dois reservatórios esteja cheio, somente será necessário suplementar água para reposição das perdas por evaporação. Um sistema típico pode perder até 20% de sua energia durante esse ciclo de geração e bombeamento, mas isso ainda é melhor do que uma perda de 100% que ocorre quando a água é liberada apenas à jusante (ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS, 2019).

Os reservatórios também são afetados pela sua quantidade de água, cujo aporte maior se dá nos meses mais chuvosos, comumente no verão e primavera, caracterizando um regime de preenchimento sazonal, no caso das hidrelétricas convencionais. A partir do outono e ao longo do inverno, o nível de água diminui gradualmente, já que a produção de energia continua, sem grandes reabastecimentos. No cenário das usinas reversíveis essa situação se modifica, uma vez que o fluxo de água deixa de seguir apenas um caminho (para baixo – produção de energia) e passa a ter bombeamento, o que acarreta maiores variações no nível da água. Para a operação da UHR, é necessário que haja água em ambos os reservatórios. Dessa forma, a tendência é que o reservatório tenha um maior nível de água no final, o que torna essa característica das UHRs um ponto positivo (BAKKEN, 2011; HANSEN & HELAND, 2012; PATOCKA, 2014).

A área alagada também é um fator importante na avaliação dos impactos ambientais das UHRs. Um estudo elaborado por Hunt et al (2016), no reservatório de Sobradinho, região Nordeste do país, mostra as vantagens da inserção de usinas reversíveis no sistema do Rio São Francisco,

principalmente na questão da área alagada do reservatório. Sobradinho é um reservatório que possui uma grande variabilidade de área alagada devido à sua operação, variando de 4.214 km² quando cheio para 1.145 km² quando vazio. Essa grande variação resulta em uma área intermediária, com aproximadamente 3.000 km², que fica alagada no período úmido e seca no período de estiagem. Essa área se constitui como uma área degradada, de solo rachado, que no período seco precisa ser percorrida por pessoas e animais em busca de água. A implementação de usinas reversíveis ajudaria o reservatório de Sobradinho a operar em sua cota mínima. A redução da cota do reservatório traria benefícios para o meio ambiente por manter essa cota fixa e permitir que matas ciliares possam ser introduzidas ao entorno do reservatório, aprimorando de forma considerável a qualidade do meio ambiente da região. Da mesma forma, a fixação da cota do reservatório beneficiaria as populações do entorno, com um lago permanente para desenvolver atividades de pesca, entretenimento, plantação irrigada, etc.

Por causa da área de alagamento, embora de pequenas dimensões, o microclima da região onde for inserida uma UHR pode ser modificado, o que provocaria alterações na temperatura, na umidade relativa do ar, na evaporação, afetando o ciclo pluvial. Para minimizar este impacto, devem ser implementados programas de monitoramento da qualidade do ar, da água e programas de monitoramento da fauna e flora (ZUCULIN et al, 2014).

Ainda em relação à água, tem-se o fenômeno da estratificação térmica, que ocorre em quase todos os lagos e reservatórios (IMBERGER, 1982 *apud* PATOCKA, 2014). Estes, por sua vez, se diferem dos lagos naturais pela complexidade de suas entradas e saídas dinâmicas. Reservatórios de usinas reversíveis terão uma maior quantidade dessas entradas e saídas, o que significa que a temperatura da água irá mudar, principalmente na fase de bombeamento, e dependerá também das características próprias do reservatório (PATOCKA, 2014). As UHRs alteram o padrão de circulação das águas, com mudanças na velocidade e direção do fluxo. Mudanças na temperatura e formação de gelo também são constatadas, como citado por Bakken (2011), na Noruega e por Hansen & Helland (2012), o que pode afetar a estratificação térmica.

Com as mudanças feitas no curso d'água, partículas podem ser carregadas, aumentando a turbidez da água. O aumento de matéria orgânica na água pode diminuir o oxigênio dissolvido e, conseqüentemente, diminuir a DBO (ZUCULIN et al, 2014). Bonalumi et al (2011) discorrem sobre os efeitos da estratificação térmica e transporte de sedimentos entre reservatórios nos Alpes suíços, relacionando-os com aumento da turbidez. Antes das operações da usina reversível começarem, em 1980, os dois reservatórios estudados não possuíam

conexão. Após as operações, a água do reservatório de Oberaarsee tornou-se mais turva, enquanto que o reservatório Grimsensee ficou com águas mais claras. Outro ponto abordado por Bonalumi et al (2011) é que as operações da UHR exercem um impacto sobre os sedimentos dos reservatórios, principalmente no inverno. A mistura induzida por turbulência causa fluxos ascendentes de partículas de tipo difusivo na coluna de água, diminuindo o conteúdo de partículas de águas profundas e, assim, reduzindo as taxas de sedimentação nos reservatórios. A distribuição de partículas modificada afeta a estratificação de densidade nos reservatórios. Durante o derretimento da neve, o reservatório com maior captação glacial (Grimsensee) torna-se muito mais turvo, o que impede a penetração da luz solar e, conseqüentemente, prejudica o desenvolvimento da estratificação de densidade induzida termicamente. Isso contrasta com o reservatório Oberaarsee (mais claro), que forma uma camada superficial quente. Como resultado, a troca de água pela operação da usina reversível durante o verão torna homogênea as concentrações de partículas em águas profundas dos dois reservatórios, mas afeta minimamente as camadas superficiais mais transparentes e mais quentes, que se tornam parcialmente desacopladas das águas profundas turvas. Uma conclusão interessante desse estudo é que as operações de uma usina reversível não afetam sedimentos arenosos, uma vez que esse material grosseiro possui assentamento rápido. Uma alternativa para diminuir a sedimentação de reservatórios é o uso de tecnologias, como por exemplo, túneis de desvio de sedimentos e descarga de reservatórios. Novas soluções técnicas e operacionais são necessárias para garantir a operação sustentável do reservatório, melhorar a eficiência e a flexibilidade operacional e ajudar a atender às regulamentações ambientais (GURUNG et al, 2016).

Com relação aos impactos na qualidade da água, Pereira (S/d) realizou um estudo sobre os impactos da implantação de uma usina reversível na ilha de São Miguel, localizada no arquipélago de Açores. Nesse estudo, constatou-se que a morfologia da ilha sempre favorecerá alguma consequência na qualidade da água, uma vez que os recursos hídricos são muito variados e interconectados entre si. A implantação de uma UHR no local pode levar a um aumento das partículas sólidas nos cursos d'água e levar à poluição, principalmente pela possibilidade de vazamento de óleo e combustível das tubulações subterrâneas, decorrentes do processo de perfuração no período de construção, o que comprometeria as nascentes de água e reservatórios de águas subterrâneas. Nesse caso específico, um outro impacto a considerar é a intrusão de salinidade e excesso de nutrientes nos corpos hídricos, impactando o abastecimento de água para consumo humano e agricultura. Em relação à usina, a movimentação da água, causada pelas turbinas, proporcionará uma maior oxigenação, o que pode ajudar na diminuição

da eutrofização do reservatório. Por outro lado, o aumento da oxigenação na costa pode levar a um maior potencial de vida marinha perto do paredão. Os benefícios de uma maior oxigenação também foram comentados por Dmitrieva et al (1992) e Arántegui (2012), onde se afirma que um sistema reversível bem planejado pode ajudar a melhorar a qualidade da água, pelo aumento da taxa de aeração, prevenindo o crescimento de algas e evitando a mortalidade de peixes. Essa melhora na qualidade da água também é comentada por Zuculin et al (2014), onde se constata que uma UHR pode contribuir para a redução do valor fertilizante da água efluente do reservatório.

Em relação à geologia, Pereira (S/d) encontrou vários impactos ambientais suscetíveis a induzir mudanças geológicas. Na construção, os principais riscos identificados foram os deslizamentos de terra e a compressão de camadas menos densas. Esses riscos podem levar à instabilidade das fundações do reservatório superior, levando-o ao colapso, o que modificaria drasticamente a geomorfologia e, conseqüentemente, as atividades naturais e antrópicas. Outra preocupação ambiental é o surgimento de juntas devido às vibrações causadas pela perfuração, necessária para a construção das tubulações subterrâneas, e pela movimentação da água durante a operação. Essas articulações podem levar à desagregação de rochas, e assim promover instabilidades, provocando deslizamentos de terra. Quanto ao solo, o principal impacto negativo está associado à alteração de suas características físicas e químicas, principalmente em solos propícios à atividade agrícola, levando a um maior risco de erosão e contaminação do solo. Esse impacto está associado à fase de construção, porém as perdas podem ser minimizadas com a alocação desses solos para outros locais. Outros impactos são a mudança na capacidade de uso da terra, sismicidade induzida pela construção das tubulações e casa de força abaixo do solo, degradação de solos para construção da barragem, instabilidade dos taludes marginais, impactos esses que demandam ações para conservação do solo por parte dos agente fiscalizadores (ZUCULIN et al, 2014).

No que tange às áreas à jusante dos reservatórios, os principais impactos das UHRs, observados por Gurung et al (2016) incluem transporte de sedimentos alterados e captação de água. Os lagos artificiais podem ajudar a aumentar os fluxos da base do rio no inverno e durante as secas, e podem contribuir para a proteção contra enchentes em vales à jusante. No entanto, eles também limitariam o transporte de sementes por fluxo, o que levaria a um reduzido intervalo de dispersão espacial. Quanto ao bombeamento em si, as alterações do fluxo da água irão provocar grandes volumes transitando por entre os reservatórios, o que pode causar danos nas

águas à jusante da barragem, no reservatório inferior (PATOCKA, 2014). Esses danos podem comprometer a capacidade de autodepuração dos rios à jusante, mas não ocorrem em usinas reversíveis de circuito fechado (ZUCULIN et al, 2014).

Por fim, outro impacto físico a ser considerado é a alteração da paisagem (BAKKEN, 2011; KEAR & CHAPMAN, 2013; PATOCKA, 2014). Reservatórios, tanto naturais quanto artificiais, são parte importante da paisagem, e em projetos de usinas hidrelétricas convencionais os impactos na paisagem são muito considerados, a fim de tornar o empreendimento aceitável para a comunidade. Quando introduzido em uma hidrelétrica, o bombeamento não irá causar grandes mudanças na paisagem, porém a mesma poderá ser alterada pela erosão da costa ou acumulação de material flutuante, com as constantes oscilações no nível da água. A exposição da zona litorânea pode causar impactos estéticos indesejados, além das mudanças no entorno, com a instalação dos novos equipamentos necessários para a geração e entrega de energia, como novas linhas de transmissão. Porém, um ponto positivo das UHRs é que estas podem ser implementadas mais próximas ao centro de carga. Isso acarreta menores custos econômicos e ambientais para a infraestrutura necessária à distribuição de energia, uma vez que as linhas de transmissão seriam menores ou até mesmo nem precisariam ser construídas, se já existirem no local (GUTIÉRREZ & ARÁNTEGUI, 2015).

3.5.2. Impactos ao meio biótico

Os impactos da energia hidrelétrica ao meio biótico são bastante complexos, porém largamente explorados, e variam de acordo com cada usina. Mesmo que o planejamento dos reservatórios consiga resolver problemas primários, a construção dos mesmos gera uma grande quantidade de problemas secundários, muitas vezes preocupantes. Os organismos são fisiologicamente adaptados para sobreviver a um habitat específico, sendo que mudanças nesse cenário podem ocasionar a destruição ou a multiplicação de espécies, o que altera toda a cadeia alimentar. Em sistemas hidrelétricos já existentes, as medidas a serem tomadas referentes ao meio biótico devem buscar atenuar os impactos. Tais medidas são fundamentais quando há intenção de adicionar o bombeamento ao sistema hidrelétrico (PATOCKA, 2014).

A perda da biodiversidade deve ser levada em conta, uma vez que a área a ser alagada pelos reservatórios pode conter espécies de flora e fauna que serão perdidas. Os ruídos causados pelas máquinas durante a fase de construção da UHR e a movimentação de terra podem afugentar animais. Mudanças no ciclo da água pode afetar espécies aquáticas. Para a implantação da usina

reversível, deve-se estudar a área previamente, e contabilizar a necessidade de supressão de vegetação. Fragmentação da paisagem, decomposição da biomassa submersa, deslocamento de animais durante o enchimento dos reservatórios também são impactos que podem ocorrer em usinas reversíveis (ZUCULIN et al, 2014). Essas interferências podem acarretar em uma destruição irreversível em áreas de interesse ecológico (KEAR & CHAPMAN, 2013). Entretanto, deve-se levar em conta que, mesmo que esses impactos ocorram, serão em graus muito menores do que os observados em hidrelétricas convencionais. Além disso, UHRs de circuito fechado são menos propensas ainda a apresentarem tais impactos. Para minimizá-los, devem ser feitos programas de monitoramento e conservação de fauna e flora e estudos para áreas de compensação ambiental (ZUCULIN et al, 2014).

O elevado trânsito das águas entre os reservatórios pode ajudar a propagar espécies, o que as tornaria exóticas, fora de seu local de costume (BAKKEN, 2011; HANSEN & HELLAND, 2012; PATOCKA, 2014). Além disso, a passagem da água pelas turbinas reversíveis, com alta pressão, torna bastante difícil a sobrevivência de espécies como peixes e outros animais aquáticos. Já espécies menores o suficiente, como fitoplâncton, zooplâncton e até pequenos macro-invertebrados, podem ser transferidos pelos reservatórios, alcançando novos ecossistemas, situação impossível sem o bombeamento. A UHR, portanto, introduz novas possibilidades às espécies presentes nos reservatórios, modificando a estrutura dos ecossistemas envolvidos. Por outro lado, essa nova condição facilita a reprodução de algas, que são indesejadas, principalmente em locais de clima mais quente (PATOCKA, 2014).

Como já discutido, a presença do bombeamento faz com que ocorram maiores flutuações do nível da água, o que acaba afetando a zona litorânea. Uma zona litorânea grande e produtiva é uma característica de lagos e rios saudáveis, contribuindo para o fornecimento de habitat e alimento. Com as mudanças no nível da água, haverá uma extensão da zona litorânea, sendo que esta ficará exposta ao ar ou será inundada frequentemente (Figura 13), o que provocará alterações de habitat, e conseqüentemente dos organismos que ali vivem (BAKKEN, 2011; PATOCKA, 2014). Isso acarretará possíveis mudanças no padrão de alimentação dessas espécies (BAKKEN, 2011).

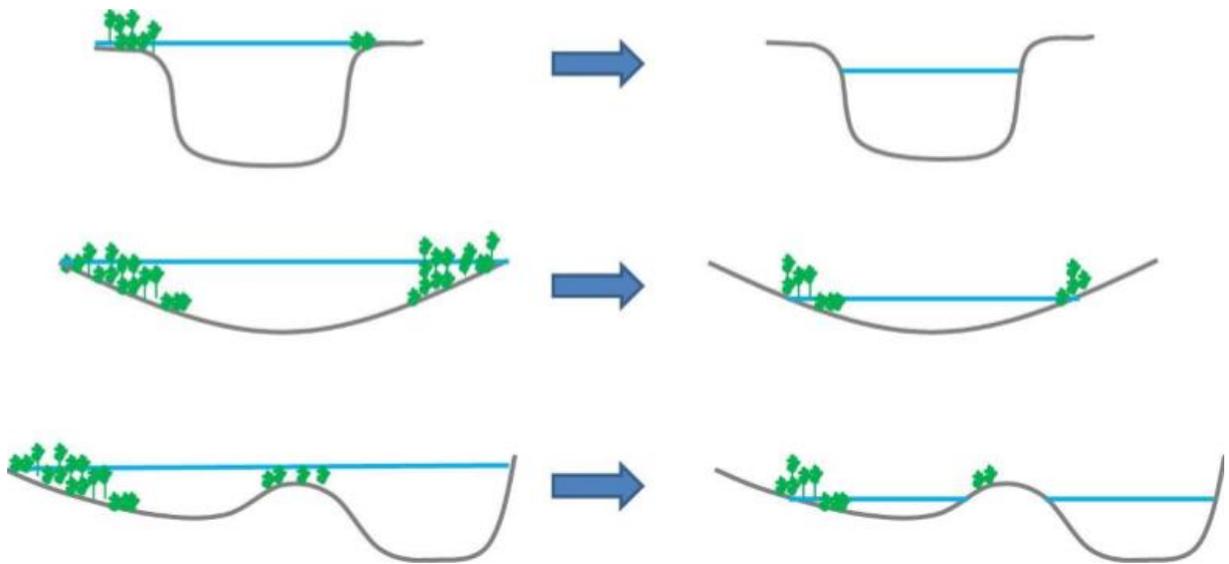


Figura 13 – Exposição da zona litorânea durante a operação de usinas reversíveis. (FONTE: HANSEN & HELLAND, 2012)

Um nível de água demasiadamente baixo pode impedir o acesso às correntes de desova de certas espécies. Além disso, existe uma relação negativa entre o número de “episódios secos” e a abundância de invertebrados bentônicos. A fauna bêntica só retorna vários meses após o nível normal da água (HANSEN & HELLAND, 2012).

Alguns impactos com relação à mortalidade de espécies aquáticas foram identificados por Dmitrieva et al (1992), como a morte de peixes na fase de bombeamento. Durante essa fase, o referido estudo observou a morte de 90% do zooplâncton, sendo esse episódio mais comum na primavera, quando as rotíferas dominam o zooplâncton. Entretanto, o estudo considerou essas perdas como não significativas, uma vez que o zooplâncton possui altas taxas de reprodução. Quanto à morte de peixes, em algumas das UHRs observadas no estudo, a quantidade não foi significativa, e em outros locais, a diversidade de organismos era maior nos reservatórios do que no próprio rio. A operação das usinas reversíveis também acarreta a mineralização de algumas substâncias orgânicas e biogênicas. O aumento dessas substâncias na zona fótica promove um aumento nos índices de reprodução de organismos planctônicos.

Outro impacto a ser considerado é o aumento da turbidez da água, que apesar de ser um fenômeno ligado ao meio físico, afeta diretamente o meio biótico, uma vez que diminui a zona fótica, prejudicando espécies de plantas aquáticas e algas, seres fotossintetizantes (DMITRIEVA et al, 1992; BAKKEN, 2011; PATOCKA, 2014). Por outro lado, em locais com formação de gelo, a operação da usina reversível pode alterar a formação da superfície

congelada do reservatório, implicando em maior luminosidade, o que estimula a produção primária (BAKKEN, 2011).

De acordo com Gurung et al (2016), os impactos ecológicos à jusante de uma UHR são avaliados observando-se os padrões de distribuição e composição das espécies e tamanho da população, ou os processos, como dinâmica populacional, interações entre espécies e estruturas e serviços ecossistêmicos. No caso do referido estudo, a tamargueira alemã (*Myricaria germanica*) foi tomada por exemplo, um arbusto aluvial que foi afetado pela dinâmica alterada do rio e hoje se encontra em risco de extinção. Esses impactos, entretanto, são mais propensos a ocorrerem em usinas de circuito aberto ou semi-aberto.

Por fim, há o impacto do aumento da mortalidade das espécies maiores, que migram e são afetadas pelas turbinas, como diversos tipos de peixes. Ao introduzir o sistema reversível, além dessas espécies migratórias, também devem receber atenção as espécies que vivem nos reservatórios, uma vez que elas serão atingidas constantemente pelos grandes volumes de água em transição (BAKKEN, 2011; PATOCKA, 2014).

3.5.3. Impactos ao meio antrópico

Os impactos socioeconômicos não se limitam ao lugar da produção de eletricidade, mas vão muito além das fronteiras nacionais. Portanto, uma avaliação completa dos impactos ambientais de UHRs deve refletir melhor seus múltiplos serviços de longo alcance, como a regulamentação da rede, assegurando o fornecimento de eletricidade confiável, bem como a prevenção de enchentes. Além disso, os futuros reservatórios podem ter de assumir a função de armazenar e fornecer água para irrigação e abastecimento de comunidades e águas subterrâneas. Esses múltiplos usos da água são vistos como prováveis gatilhos de novos conflitos sobre recursos, mas refletem o amplo interesse no armazenamento de água e energia (ARÁNTGUI, 2012; GURUNG et al, 2016).

É necessária a compreensão de que as usinas hidrelétricas reversíveis não são usinas hidrelétricas convencionais que seguem o fluxo do rio com barragens. Na verdade, um reservatório à montante (platô mais elevado) e outro à jusante (platô mais baixo) realizam o trabalho de bombeamento (noite) e turbinamento (no horário de ponta ou ao longo do dia, quando o objetivo é minimizar as oscilações do fornecimento de energia elétrica). Desta forma, os impactos socioambientais, como deslocamento de populações ribeirinhas para implantação

de reservatórios não ocorre, bem como a redução de peixes na região, nem tampouco afeta as cidades na irrigação, consumo da água e transporte fluviais, ou seja, os múltiplos usos da água podem ser preservados na bacia hidrográfica, quando bem planejados. Mesmo com eficiência de 75-80% no processo de reversão, o volume alagado pode ser variável, facilitando o controle de energia no sistema elétrico quando necessário e, conseqüentemente, o volume de água, sem configurar um dilema quanto aos seus outros usos. As UHRs mitigam, desta forma, um nexo entre a água e a energia, uma vez que as hidrelétricas convencionais necessitam de grande volume de água armazenada, afetando os múltiplos usos dentro da bacia hidrográfica inserida e provocando grandes impactos ambientais. As usinas reversíveis, então, aparecem como uma solução viável para redução das emissões de gases de efeito estufa e reduzem o *trade-off* entre água e energia (RICETTA et al, 2015).

De acordo com Pereira (S/d), os impactos socioeconômicos dependem de três principais aspectos: território, população e economia. Quanto ao território, Pereira (S/d) comenta sobre a alteração da paisagem. O fato que, na maioria dos casos, em usinas hidrelétricas reversíveis, os dutos são construídos de forma subterrânea, constitui-se numa alternativa para preservar a paisagem natural. Em nível de população, o estudo comenta que podem não haver grandes efeitos negativos, embora a população próxima ao local de implantação de uma UHR possa sofrer com ruídos e vibrações durante a fase de construção. Quanto à economia, Pereira (S/d) comenta que os impactos dependem do setor analisado. No setor primário, o impacto é relacionado com a possibilidade de diminuição de terras agricultáveis. O setor secundário, por outro lado, pode se beneficiar do projeto, principalmente na fase de construção. A área elétrica será impactada positivamente, pela diminuição da dependência de combustíveis fósseis. No caso do estudo, segundo Pereira (S/d), a não implementação da UHR na ilha de São Miguel acarretaria na criação de uma política de eficiência energética, reduzindo a produção de energia em 5,15% e, conseqüentemente, o consumo de óleo, o que reduziria anualmente as emissões de CO₂ em 10,5%. No entanto, a ausência da UHR tornaria impossível elevar a capacidade geotérmica da ilha e tornaria a energia eólica menos rentável em termos energéticos. Já a presença de uma UHR mudaria completamente o cenário, possibilitando armazenar o excedente de energia renovável, aumentando os lucros da energia eólica e tornando possível expandir a capacidade de geração geotérmica. Com a implementação da UHR, a produção por energias renováveis na ilha seria de 72%, com uma redução de 25% de emissões de CO₂. Já o terceiro setor seria afetado pelas atividades turísticas, pois a implantação de uma UHR na ilha de São Miguel transformaria uma paisagem desconhecida em potencial *site* turístico.

Um dos impactos socioeconômicos mais comuns nos reservatórios é referente à atividade da pesca. No caso de um reservatório já existente, utilizado para fins de produção comercial, pesca recreativa ou subsistência, a introdução do bombeamento pode acarretar em grandes impactos, seja pelo aumento da mortalidade de peixes devido às turbinas ou pela mudança no habitat. Portanto, os usos múltiplos do reservatório devem ser levados em consideração, a fim de não prejudicar a comunidade envolvida (PATOCKA, 2014). Ainda sobre os usos múltiplos dos reservatórios, existem as atividades de recreação, das quais dependem proprietários de caiaques e barcos de passeio, pescadores, ciclistas e população ligada à atividade turística. Com a usina reversível, algumas mudanças podem afetar essas atividades, como os grandes fluxos de água entre os reservatórios e alterações na faixa litorânea (PATOCKA, 2014).

No estudo de Hunt et al (2016), a construção de UHRs terá como consequência o rebaixamento do nível do reservatório de Sobradinho, que passará a ter um nível fixo. Essa nova área poderá ser utilizada em diversos setores, sendo um dos mais promissores, em termos de benefícios econômicos, o da agricultura irrigada. O desenvolvimento da agricultura irrigada resultará no aumento do excedente agrícola, maior disponibilidade de alimentos, aumento da renda do agricultor, geração de empregos no setor primário, fortalecimento de núcleos urbanos e do parque agroindustrial. Além disso, resultará na reorientação de fluxos migratórios, dirigindo-os das zonas menos favoráveis para aquelas com maior vocação para irrigação, podendo facilitar o estabelecimento do homem no campo, mesmo que seja por via da agricultura familiar.

A implantação e operação de uma usina reversível pode trazer mudanças positivas e negativas na vida da população afetada. Os impactos negativos são, por exemplo, a desapropriação de terras para a implantação da UHR, transferência compulsória da população (caso necessário), problemas habitacionais durante a fase de construção da barragem, presença de animais que oferecem perigo para o homem, proliferação de doenças com a chegada de novos indivíduos, surgimento de choques entre a população local e o contingente alocado à construção do empreendimento, surgimento de situações de apreensão e insegurança, em face da incerteza das futuras condições de vida, falta de matérias-primas em decorrência da inundação, desorganização das atividades agrícolas e pesqueiras, perda de áreas agrícolas, com o consequente decréscimo da produção de alimentos e outros produtos agropecuários. Para minimizar esses impactos, faz-se necessário implantar programas de educação ambiental, de comunicação social e de reassentamento da população diretamente afetada, se houver. O

impacto positivo é relativo à movimentação da economia, com geração de empregos utilizando mão-de-obra local (ZUCULIN et al, 2014).

Por fim, pode haver perdas de patrimônio, com as áreas de alagamento, como cidades construídas anteriormente e paisagens naturais com potencial turístico, ocasionando desarticulação de elementos culturais. Também podem ocorrer possíveis perdas arqueológicas. Para minimizar este impacto, deverá ser feito um programa prévio de identificação e salvamento de bens arqueológicos (ZUCULIN et al, 2014).

3.5.4. Impactos ao meio legislativo

Nesse tópico serão apresentados os impactos gerais e também de aspecto regulatório, que são impactos muito relevantes para a avaliação das usinas reversíveis, mas não se enquadram nas categorias anteriores.

As UHRs, assim como qualquer outro sistema de armazenamento de energia, ainda não possuem regulação própria no Brasil, porém no que se refere à providências de licenciamento ambiental, as UHRs oferecem um procedimento facilitado, pois necessitam de uma área de armazenamento menor para poderem operar (SIL, 2017).

O Brasil apresenta grande potencial hidráulico, porém, a fim de reduzir o impacto ambiental desses aproveitamentos, as novas hidrelétricas têm sido licenciadas sem considerar a formação de reservatórios. Ou seja, essas novas usinas não armazenam água e funcionam usando a vazão natural dos rios. Por isso, são chamadas de usinas a fio d'água. Sem a possibilidade de armazenar água, o bom funcionamento das hidrelétricas passou a depender de um regime favorável de chuvas. Como o Brasil tem um sistema elétrico interligado, o operador nacional responsável pelo seu gerenciamento procura compensar essa variação transferindo energia de uma região para outra, por meio de longas linhas de transmissão. Mas há um limite físico para tal transferência. Dessa forma, o país também investe em centrais térmicas para criar uma reserva de energia. Logo, para efeito de se minimizar o impacto ambiental, o fato de as novas usinas hidrelétricas não terem mais reservatórios é nulo ou até negativo, pois tal ausência terá de ser compensada por centrais térmicas que, ao serem acionadas, queimarão gás natural, diesel, óleo combustível ou carvão. As térmicas previstas para até 2020 triplicarão as emissões de CO₂ pelo setor energético. De maneira criteriosa, o Brasil deveria rever a restrição aos reservatórios. Em locais onde a formação dos lagos exigiria a remoção de grande número de moradores ou o

alagamento de terras férteis, com variedade de espécies animais e vegetais, um reservatório pode realmente não fazer sentido. Mas em outros locais, com baixa densidade demográfica e que passam boa parte do ano alagados naturalmente pelas cheias dos rios, o reservatório é uma opção a ser considerada (GLOBO, 2012 *apud* ZUCULIN et al, 2014). Nesse sentido, as UHRs são fundamentais para o setor energético, pois conseguem reduzir as emissões provenientes da geração térmica, reduzir as variações de preço dos combustíveis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, como SO₂, NO₂ e CO₂ (NAZARI et al, 2010), o que se constituem em impactos positivos importantes. Além disso, as UHRs têm a capacidade de remover a intermitência de fontes renováveis, como eólica e solar, e aumentam a segurança energética do Brasil, por descentralizarem o potencial de armazenamento energético, que hoje se concentra predominantemente na região Sudeste (HUNT et al, 2016).

Outro impacto é o aumento do custo, pela necessidade de construir as estruturas abaixo do solo (GUTIÉRREZ & ARÁNTEGUI, 2015). A participação de organizações públicas voltadas para questões ambientais, o atendimento à legislação pertinente e a divulgação e/ou apoio (financeiro ou logístico) de práticas ambientalmente corretas são impactos considerados por Zuculin et al (2014), principalmente devido ao risco de essas ações não acontecerem, o que pode ocorrer também nas UHRs.

4. METODOLOGIA

A fim de se atingir os objetivos propostos nesta dissertação, foram utilizados os seguintes procedimentos:

4.1. *Check-list* de impactos ambientais das UHRs

Com base na revisão bibliográfica, realizada em trabalhos e artigos nacionais e internacionais disponíveis na literatura, acerca dos impactos ambientais das UHRs, apresentada na seção 3.5, foi construída uma listagem de verificação, ou *check-list*, própria para usinas hidrelétricas reversíveis. O *check-list* foi organizado dispondo-se os impactos nos meios físico, biótico, antrópico e legislativo, agrupando-os em categorias, de acordo com as características de cada impacto, como ilustra a Figura 14.

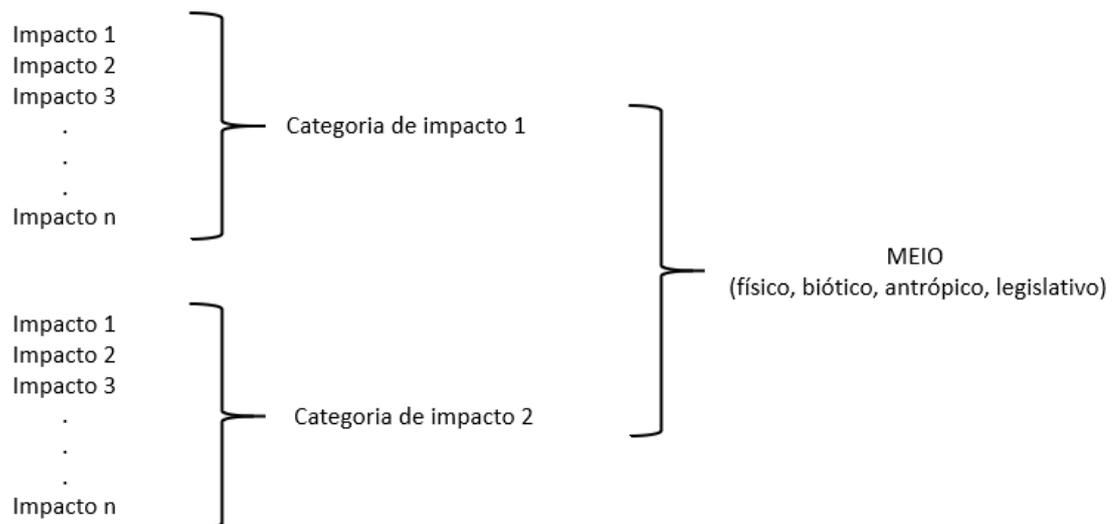


Figura 14 – Esquematização da montagem do *check-list* de impactos ambientais das UHRs.

(FONTE: elaborado pela autora)

4.2. Aplicação do método quantitativo utilizando estudo de caso

Na primeira etapa, de posse do *check-list* com os impactos ambientais das UHRs, elaborou-se uma planilha de impactos ambientais, que foi aplicada sob a forma de questionário, *online* e impresso.

A construção de um questionário, segundo Aaker et al (2001, *apud* CARMO, 2013), é considerada uma “arte imperfeita”, pois não existem procedimentos exatos que garantam que os objetivos de medição sejam alcançados com boa qualidade. Fatores como bom senso e experiência do pesquisador podem evitar vários tipos de erros em questionários, como questões ambíguas. No entanto, existe uma sequência de etapas lógicas que o pesquisador deve seguir para desenvolver um questionário:

- 1 – Planejar o que vai ser mensurado, definindo objetivo e assunto da pesquisa;
- 2 – Formular as perguntas para obter as informações necessárias;
- 3 – Definir o texto, a ordem das perguntas e o aspecto visual do questionário, agrupando as questões de mesmo assunto em subtópicos;
- 4 – Testar o questionário, utilizando uma pequena amostra; e
- 5 – Caso necessário, corrigir os problemas identificados e fazer novo pré-teste.

Nessa primeira etapa, o assunto do questionário era os impactos ambientais das UHRs de forma geral. O objetivo do questionário foi classificar, em uma escala de 0 a 5, a intensidade de cada impacto listado, sendo a nota zero atribuída a um impacto muito pequeno, passando pelos impactos medianos, até impactos muito grandes (nota cinco). As perguntas se constituíram nos próprios impactos ambientais e foram organizadas de tal forma que o respondente avaliava cada impacto individualmente, depois cada categoria ou agrupamento de impactos e, por último, cada meio (físico, biótico, antrópico e legislativo), de acordo como apresentado na Figura 14. As respostas foram elaboradas em formato de múltipla escolha. As vantagens desse formato são a facilidade de aplicação e análise, rapidez para responder e pouca possibilidade de erros. Entretanto, exigem elevado tempo de preparação das opções de resposta e o respondente pode ser influenciado pelas alternativas apresentadas (CARMO, 2013). O público-alvo escolhido foram os alunos de pós-graduação em Engenharia de Energia da UNIFEI e o período de aplicação do questionário foi entre novembro de 2018 a março de 2019.

Ao final, as notas dos questionários foram compiladas e fez-se uma média ponderada, a fim de atribuir um indicador, ou peso, a cada impacto, categoria e meio. Os indicadores, então, variavam de 0 a 5. Para que todas as colunas somassem 1 (um) ou 100%, fez-se a conversão dos pesos em porcentagem, para que todos pudessem variar de 0 a 1.

Em uma segunda etapa, de posse da mesma planilha de impactos ambientais, agora já com os indicadores compilados, aplicou-se novamente o questionário, de forma *online* e impressa, para o mesmo público-alvo. Dessa vez, o objetivo do questionário foi avaliar os impactos ambientais das UHRs tomando como base o estudo de caso selecionado para esta dissertação. Os respondentes receberam as instruções e os detalhes do projeto, como a caracterização do meio, localização, dados de potência, área alagada, energia gerada, entre outros, a fim de basearem suas análises ao caso em questão. Nessa segunda etapa, foi avaliado se o impacto era positivo ou negativo em uma escala de 0 a 1, de acordo com a Tabela 5, sendo analisados somente os impactos em si.

Tabela 5 – Escala de Notas
(FONTE: Elaborado pela autora)

Nota	Significado
0	Não se aplica
0,1	Péssimo
0,2	Muito Ruim
0,3	Ruim
0,4	Pouco Ruim
0,5	Indiferente
0,6	Pouco Bom
0,7	Bom
0,8	Muito Bom
0,9	Ótimo
1	Excelente

A nota final de cada categoria ficou como segue na Equação 1:

$$NC = \left(\sum_{i=1}^n NI_i * II_i \right) * IC \quad (1)$$

Onde:

NC = nota da categoria;

NI = nota do impacto;

II = indicador do impacto;

IC = indicador da categoria;

A nota final de cada meio ficou como segue na Equação 2:

$$NM = \sum NC * IM \quad (2)$$

NM = nota do meio;

IM = indicador do meio;

A nota final da planilha ficou como segue na Equação 3:

$$NF = \sum NM \quad (3)$$

Onde:

NF = nota final;

Fez-se esses cálculos para todas as planilhas obtidas pela pesquisa. Ao final, pode-se obter uma nota média para o estudo de caso analisado, sendo possível classificá-lo dentro da escala utilizada na Tabela 5 e prosseguir com a análise dos resultados.

4.3. Definição da incerteza da amostragem

Quando se realiza uma pesquisa ou utiliza-se de algum mecanismo para obter informações, um dos objetivos principais é utilizar dados coletados de uma pequena parte (amostra) de um grande grupo para entender o comportamento desse grupo maior (população) (MAYER, 2016).

Nas pesquisas científicas também é comum observar-se apenas uma amostra de certos elementos e, a partir dos resultados dessa amostra, obter valores aproximados, ou estimativas, para as características populacionais de interesse. Este tipo de pesquisa é chamado de “levantamento por amostragem”. Em um levantamento por amostragem, a seleção dos elementos que serão efetivamente observados deve ser feita sob uma metodologia adequada, de tal forma que os resultados da amostra forneçam informações que tornem possível avaliar as características de toda a população (BARBETTA, 2004).

As amostragens podem ser probabilísticas e não-probabilísticas. A amostragem probabilística é uma seleção aleatória, de tal forma que cada elemento da população tem a mesma probabilidade de fazer parte da amostra. Já a amostragem não-probabilística depende dos critérios e julgamentos do pesquisador, constitui-se como uma amostragem em que há uma escolha deliberada dos elementos da amostra (MAYER, 2016).

Dentro da amostragem probabilística, existe a Amostragem Aleatória Simples (AAS), processo que garante que todas as possíveis amostras de tamanho n tenham a mesma probabilidade de serem escolhidas. Através de um procedimento aleatório, sorteia-se com igual probabilidade uma unidade da população. Esse é o método mais simples, porém o mais importante e fornece a base para muitos outros esquemas amostrais mais complexos (VIEIRA & BESSEGATO, 2013).

Para se determinar o tamanho da amostra a serem aplicados os questionários, foi preciso definir, primeiramente, seu tamanho mínimo necessário, especificando-se o grau de confiança desejado. Segundo Barbetta (2002), o número aproximado da amostra relacionado ao erro tolerável é dado pela Equação 4:

$$n_0 = \frac{1}{E_0^2} \quad (4)$$

Onde:

n_0 = primeira aproximação do tamanho da amostra;

E^2_0 = erro amostral tolerável.

O tamanho da amostra n é dado, então, pela Equação 5:

$$n = \frac{N * n_0}{N + n_0} \quad (5)$$

Onde:

N = tamanho da população;

n = tamanho da amostra

Utilizando-se as Equações 4 e 5, pode-se definir o tamanho mínimo necessário da amostragem. O intervalo de confiança adotado foi de 95%, o mais comum dos intervalos relatados na literatura. No entanto, é possível usar intervalos de confiança de 90% ou 99%, caso se deseje mais ou menos confiança (PATINO & FERREIRA, 2015). A incerteza escolhida para essa pesquisa foi de 10%. Logo, a primeira aproximação do tamanho da amostra foi igual a 100 (Equação 4).

A seguir, no próximo capítulo, será apresentado o estudo de caso selecionado para essa dissertação.

5. ESTUDO DE CASO

Neste trabalho, foi utilizada 1 (uma) proposta de projeto como base para as análises de impacto ambiental acerca do armazenamento de energia via usinas reversíveis. O projeto selecionado foi: “Sistema de armazenamento de energia via Pequenas Centrais Hidrelétricas Reversíveis combinadas com Centrais Hidrelétricas de Ultrabaixa Queda”, elaborado para a Eletronorte, como proposta de pesquisa e desenvolvimento tecnológico confeccionado pelo CERPCH da UNIFEI.

A Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (Eletronorte) é uma concessionária de serviço público de energia elétrica. Criada em 1973, com sede no Distrito Federal, gera e fornece energia elétrica aos nove estados da chamada Amazônia Legal – Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins. Por meio do Sistema Interligado Nacional – SIN, também fornece energia a compradores das demais regiões do país (ELETRONORTE (a), S/d).

O Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH, localizado na Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, foi criado por meio de um convênio assinado em 1998, buscando atender a resolução do III Encontro para o Desenvolvimento de Energias Solar, Eólica, Biomassa, e Pequenas Centrais Hidrelétricas. O CERPCH tem por objetivo promover a divulgação dos pequenos potenciais hidroenergéticos, por meio de rede de informação, projetos, pesquisa, desenvolvimento científico e tecnológico e também promover a capacitação e treinamento nesta área de atuação, além da realização de eventos (CERPCH, 2017).

5.1. Estudo de caso “Curuá-Una”

“Sistema de Armazenamento de energia via Pequenas Centrais Hidrelétricas Reversíveis combinadas com Centrais Hidrelétricas de Ultrabaixa Queda”

Essa proposta de projeto visa à implementação de uma pequena central hidrelétrica reversível (PCHR) e uma central hidrelétrica de ultrabaixa queda (CHUBQ) na Usina Hidrelétrica de Curuá-Una, localizada no estado do Pará, região Norte do país (Figura 14). A UHE Curuá-Una possui uma potência instalada de 30,3 MW, gerando energia através das águas do rio Curuá-Una. Em conjunto com a UHE de Tucuruí, é responsável por atender 99% da demanda energética do estado do Pará (ELETRONORTE, S/d).

Notadamente, a região Norte do Brasil é conhecida pelos rios caudalosos com baixa declividade e baixas velocidades. Nesse contexto, a UHE Curuá-Una foi alvo de um estudo recente realizado pela equipe do CERPCH, apoiado pela Embaixada do Reino Unido e pela Eletronorte, onde se avaliou o potencial hidrocínético à jusante de duas usinas dentro da área de concessão da Eletronorte, para implantação de um parque hidrocínético. A referida usina (Curuá-Una) foi uma das investigadas, e sua escolha para a presente proposta se deu por apresentar condições favoráveis à aplicação apresentada.

Neste projeto, a pequena central reversível seria instalada próxima à hidrelétrica, enquanto que a usina de ultrabaixa queda seria instalada à jusante da UHE Curuá-Una (Figura 15), sendo sua principal função o fornecimento de energia ao sistema Curuá-Una, de forma a compensar a energia consumida pela central reversível operando no modo de bombeamento.

A proposta visa a garantir a complementaridade de duas fontes renováveis de energia, além de realizar o armazenamento sustentável. A energia necessária para a operação da PCHR em modo de bombeamento seria disponibilizada pela rede elétrica, em um primeiro momento, sendo compensada posteriormente pela energia gerada pela CHUBQ. Dessa forma, o projeto contorna a falta de uma tarifação diferenciada para a PCHR em períodos distintos do dia.



Figura 15 - Localização da UHE Curuá-Una no estado do Pará (à esquerda); UHE Curuá-Una (à direita) (FONTE: ELETRONORTE (b), S/d)



Figura 16 - Vista geral das localizações dos reservatórios da PCHR e da planta CHUBQ (FONTE: ELETRONORTE, 2018)

A Tabela 6, a seguir, explana as características técnicas da pequena central hidrelétrica reversível, estipuladas de forma a atender as condições do edital da Eletronorte:

Tabela 6 – Dados técnicos da PCH Reversível (FONTE: ELETRONORTE, 2018)

Desnível entre os reservatórios	90 metros
Área do reservatório superior	117.912,46 m ²
Área do reservatório inferior	117.912,46 m ²
Potência instalada	5 MW
Capacidade de geração diária	120 MWh/dia
Geração de energia anual	14.520 MWh/ano
Consumo no modo bombeamento	20.754,84 MWh/ano
Saldo negativo de energia	6.234,84 MWh/ano

Tabela 6 – Dados técnicos da PCH Reversível (FONTE: ELETRONORTE, 2018)

Tempo de bombeamento	48 horas
Tempo de turbinamento	24 horas
Regime de operação	1:2
Número de ciclos de operação (por ano)	121 ciclos
Comprimento da tubulação	2.200 metros
Vazão da turbina	6,82 m ³ /s

Para a construção do reservatório superior, prevê-se escavar o solo e, com a terra retirada da escavação, construir um dique de 5 metros de altura ao longo do seu perímetro.

Como pode ser visto pela Tabela 6, o déficit de energia proveniente da pequena central reversível é igual a 6.234,84 MWh/ano, devido ao fato de que a central consome mais energia, na fase de bombeamento, do que produz, no modo de turbinamento. Esse déficit chega a ser até 43% maior do que a energia a ser gerada em modo turbina. Logo, a central de ultrabaixa queda foi dimensionada a fim de suprir esse saldo negativo, totalizando uma potência instalada na ordem de 712 kW. O ciclo de operação da pequena central reversível é de 1:2, ou seja, para cada 1 período operando como turbina (gerando energia) serão necessários 2 períodos operando como bomba, consumindo energia e repondo a água no reservatório superior. Essa configuração evita um superdimensionamento do sistema quando operando como bombeamento e resulta num ciclo de operação de 3 dias (2 dias bombeando + 1 dia turbinando), totalizando 121 ciclos por ano.

Em relação à área dos reservatórios da pequena central reversível, que juntos totalizam 235.824,92 m², constitui-se em uma grande vantagem frente à grandes reservatórios de hidrelétricas convencionais, pois juntos os reservatórios da pequena central reversível são cerca de 300 vezes menores que o reservatório da UHE Curuá-Una, que possui uma área de aproximadamente 78 km², segundo dados obtidos em Costa et al (2017).

O empreendimento completo foi avaliado em R\$ 70.000.000,00 (ELETRONORTE, 2018), resultando num custo unitário de 14.000,00 R\$/kW, valor consideravelmente competitivo em

relação a outras fontes renováveis disponíveis no mercado, como a eólica e a solar, que apresentam custos em torno de US\$ 2.500/kW e US\$ 7.000/kW, respectivamente.

Assim como as usinas de acumulação, uma UHR possui restrições ambientais para que seja feita sua implementação. Essas restrições são referentes às áreas de proteção ambiental, com relação ao alagamento necessário para a construção dos reservatórios. Contudo, com o aprimoramento da tecnologia, a área alagada necessária para o armazenamento de energia é menor se comparado a usinas de regulação convencionais. Além disso, uma vez cheios os reservatórios, a água utilizada para armazenar energia e gerar eletricidade sempre será a mesma, visto que a usina opera num circuito fechado. Do rio, a usina demandará apenas água para repor as perdas por infiltração e por evaporação. Dessa forma, o impacto da usina ao curso d'água será praticamente nulo. Além disso, as UHRs devem respeitar as restrições hidrológicas em relação às vazões do rio, mesmo que essas tenham como consumo somente as reposições devido às perdas por infiltração e por evaporação.

Do ponto de vista do setor elétrico, a UHR irá contribuir com a geração intermitente de 5 MW. Além disso, o modelo desenvolvido poderá ser multiplicado em outras regiões, contribuindo significativamente para o aumento da capacidade de armazenamento energético no país, bem como no incremento de geração através de fontes renováveis, e com menores intermitências em relação a energia solar ou eólica.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na metodologia descrita na seção 4, seguem os resultados obtidos nessa dissertação.

6.1. *Check-list* de impactos ambientais das UHRs

De posse de todos os impactos ambientais identificados na seção 3.5, por meio da revisão bibliográfica, e seguindo a metodologia descrita na seção 4.1, foi possível construir e organizar o *check-list* de impactos ambientais das usinas hidrelétricas reversíveis, como segue no Quadro 1:

Quadro 1 – *Check-list* de impactos ambientais das UHRs

MEIO	IMPACTO AMBIENTAL
FÍSICO	IMPACTOS REFERENTES AO RESERVATÓRIO
	Tamanho da área alagada
	Influência no regime fluvial da bacia, uma vez cheios os reservatórios
	Emissão de CO ₂ , devido ao tamanho dos reservatórios
	Alteração no clima da região, afetando o microclima local em termos de umidade do ar, regime de chuvas, evaporação e temperatura
	IMPACTOS DE CONSTRUÇÃO
	Construção da barragem e tubulações
	Evita a instalação de novas linhas de transmissão
	Exige a construção de comportas e casa de força abaixo do solo
	IMPACTOS NO MEIO HÍDRICO
	Mudanças nos recursos hídricos a longo prazo
	Transformação do meio hídrico
	Alteração da paisagem

Quadro 1 – *Check-list* de impactos ambientais das UHRs

MEIO	IMPACTO AMBIENTAL
	Variação da zona litorânea permanentemente alagada dos reservatórios
	Intensificação de processos erosivos e assoreamento do reservatório, com contaminação da água
	Maior risco de erosão nas encostas e à jusante da barragem
	Deslizamento de encostas
	Modificação dos cursos de água
	Transposição de águas (pode ocorrer apenas para enchimento inicial dos reservatórios)
	Possibilidade de reversão do fluxo do rio
	Variabilidade dos níveis de água à jusante da barragem
	Mudanças no nível da água mais rápidas e frequentes
	IMPACTOS NA QUALIDADE DA ÁGUA
	Mudanças na temperatura da água e na formação de gelo
	Presença de odores desagradáveis pela constante exposição da zona litorânea do reservatório na fase de bombeamento
	Transporte de sedimentos alterados
	Degradação da qualidade dos sedimentos
	Proliferação de macrófitas aquáticas
	Contaminação e eutrofização das águas
	Degradação da qualidade da água
	Redução na capacidade de autodepuração dos rios à jusante
	Mudanças no processo de estratificação térmica
	Redução do valor fertilizante da água efluente
	Aumento da matéria orgânica na água, o que pode diminuir o oxigênio dissolvido (diminuição DBO)
	Menor visibilidade da água pelo aumento da turbidez, causado pelo revolvimento de partículas do fundo do reservatório
	IMPACTOS NO SOLO

Quadro 1 – *Check-list* de impactos ambientais das UHRs

MEIO	IMPACTO AMBIENTAL
	Sismicidade induzida (principalmente pela construção de comportas e casas de forças abaixo do solo)
	Mudança na capacidade de uso da terra e do solo
	Degradação de solos para construção da barragem
	Ocupação de áreas de terras
	Contaminação do solo pela acumulação de efluentes agrícolas e sanitários
	Ações para conservação do solo
	Instabilidade dos taludes marginais do reservatório
BIÓTICO	IMPACTOS NA FLORA
	Impactos na produção biótica nas zonas litorâneas
	Perda da biodiversidade e afugentamento de espécies
	Perda de valor ambiental pela redução de serviços ecossistêmicos
	Impactos em áreas de interesse ecológico
	Supressão da vegetação e áreas florestais
	Fragmentação da paisagem
	Decomposição da biomassa submergida
	IMPACTOS NA FAUNA
	Perda de habitats
	Risco de propagação de espécies entre os reservatórios, o que as tornaria exóticas
	Interrupção da migração de peixes
	Impedimento ao deslocamento da fauna aquática
	Presença de estruturas que impedem a migração de animais
	Alteração no padrão de alimentação das espécies das zonas litorâneas dos reservatórios
	Alterações na cadeia trófica

Quadro 1 – *Check-list* de impactos ambientais das UHRs

MEIO	IMPACTO AMBIENTAL
	Deslocamento de animais durante o enchimento dos reservatórios
	Alterações na composição da fauna
	Mortandade de peixes à jusante da barragem
	Alterações na composição da ictiofauna
	Mortalidade de espécies maiores
ANTRÓPICO	IMPACTOS AO SER HUMANO
	Desapropriação de terras
	Proliferação de doenças, pela chegada de novos indivíduos (fase de construção)
	Presença de animais (perigo para o homem)
	Transferência compulsória da população afetada
	Problemas habitacionais durante a fase de construção da barragem
	Surgimento de choques entre a população local e o contingente alocado à construção
	Insegurança e incertezas em relação às futuras condições de vida
	Desorganização das atividades agrícolas e pesqueiras
	Perda de áreas agrícolas, com conseqüente diminuição na produção de alimentos
	Falta de matérias-primas em decorrência da inundação
	Interrupção do ciclo natural de cheias, com conseqüente perda de produtividade agrícola
	Perda de áreas produtivas
	Geração de emprego
	Possibilidade de prevenção de enchentes
IMPACTOS CULTURAIS	
	Impactos nas atividades recreativas dos reservatórios
	Perda de patrimônio cultural e recursos arqueológicos

Quadro 1 – *Check-list* de impactos ambientais das UHRs

MEIO	IMPACTO AMBIENTAL
	Perda de paisagens naturais com potencial turístico
LEGISLATIVO	Licenciamento ambiental mais fácil, pela área de armazenamento dos reservatórios ser menor
	Participação de organizações públicas voltadas para questões ambientais
	Atendimento à legislação pertinente
	Divulgação e apoio (financeiro ou logístico) de práticas ambientalmente corretas
	Aumento do custo, pela necessidade de construir as comportas e casas de força abaixo do solo
	Redução da intermitência das fontes renováveis e seus efeitos na rede elétrica
	Redução das perdas na transmissão, pelas UHRs poderem estar próximas aos centros de carga
	Redução das emissões provenientes das termelétricas
	Regulação da rede elétrica
	Fornecimento de eletricidade confiável

Com o *check-list* em mãos, passou-se para a segunda fase dessa dissertação, que se consistiu na aplicação do método quantitativo e análise dos resultados.

6.2. Aplicação do método quantitativo utilizando estudo de caso

Na primeira etapa da aplicação do questionário, foi utilizado o *check-list* apresentado anteriormente, em formato de planilha, para que os respondentes atribuíssem suas notas de 0 a 5 para cada impacto, categoria e meio. Foram obtidas 36 respostas nessa primeira fase. De posse dos 36 questionários respondidos, foi feita uma média ponderada para se obter o indicador para cada impacto, categoria e meio. Depois, fez-se a codificação dos valores em porcentagem, obtendo-se então indicadores, ou pesos, que variavam de 0 a 1.

O resultado da planilha do *check-list* com os respectivos pesos encontra-se no Apêndice A, no final dessa dissertação.

Na segunda etapa, o questionário foi aplicado para o estudo de caso do projeto de Curuá-Una, obtendo-se 30 respostas. As notas de cada planilha foram calculadas, de acordo com as Equações 1, 2 e 3 já apresentadas.

A Tabela 7 traz os resultados obtidos para o meio físico.

Tabela 7 – Resultados obtidos para o meio físico

Colaborador	Reservatório	Construção	Meio Hídrico	Qualidade da Água	Solo	Meio Físico
Colaborador 1	0,15	0,10	0,14	0,07	0,09	0,56
Colaborador 2	0,17	0,10	0,12	0,07	0,08	0,54
Colaborador 3	0,14	0,10	0,09	0,07	0,09	0,48
Colaborador 4	0,10	0,11	0,09	0,08	0,07	0,46
Colaborador 5	0,21	0,09	0,10	0,09	0,08	0,56
Colaborador 6	0,16	0,11	0,07	0,07	0,08	0,48
Colaborador 7	0,17	0,09	0,08	0,05	0,05	0,45
Colaborador 8	0,20	0,12	0,12	0,09	0,10	0,62
Colaborador 9	0,09	0,12	0,09	0,07	0,09	0,46
Colaborador 10	0,18	0,10	0,11	0,06	0,07	0,51
Colaborador 11	0,19	0,10	0,09	0,05	0,09	0,52
Colaborador 12	0,20	0,10	0,15	0,10	0,10	0,65
Colaborador 13	0,17	0,11	0,15	0,09	0,10	0,62
Colaborador 14	0,15	0,04	0,08	0,06	0,08	0,40
Colaborador 15	0,05	0,09	0,04	0,05	0,05	0,28
Colaborador 16	0,09	0,08	0,10	0,08	0,08	0,42
Colaborador 17	0,16	0,10	0,08	0,06	0,08	0,47
Colaborador 18	0,23	0,15	0,14	0,13	0,14	0,80
Colaborador 19	0,11	0,08	0,06	0,06	0,07	0,38
Colaborador 20	0,18	0,15	0,12	0,07	0,11	0,62
Colaborador 21	0,10	0,08	0,10	0,07	0,08	0,43
Colaborador 22	0,16	0,06	0,05	0,06	0,07	0,40
Colaborador 23	0,07	0,10	0,03	0,05	0,07	0,33
Colaborador 24	0,15	0,08	0,12	0,09	0,09	0,53
Colaborador 25	0,17	0,07	0,05	0,04	0,06	0,38
Colaborador 26	0,15	0,06	0,06	0,07	0,08	0,42
Colaborador 27	0,16	0,10	0,11	0,10	0,09	0,57
Colaborador 28	0,09	0,08	0,05	0,05	0,06	0,34
Colaborador 29	0,11	0,16	0,12	0,07	0,08	0,54
Colaborador 30	0,17	0,05	0,04	0,02	0,06	0,35
Média	0,15	0,10	0,09	0,07	0,08	0,49

Na Tabela 7, os dados para os impactos ao reservatório, construção, meio hídrico, qualidade da água e solo já estão multiplicados pelos seus respectivos pesos ou indicadores. A última coluna mostra o somatório obtido para o meio físico, sem multiplicar pelo seu respectivo peso. A nota média final para o meio físico foi de 0,49, nota que corresponde à classificação entre “pouco ruim” e “indiferente”, de acordo com a Tabela 5 (página 68). Ou seja, na opinião dos colaboradores entrevistados, os impactos ao meio físico ocasionados pela implantação de uma UHR em Curuá-Una são indiferentes. Isso se deve ao fato de que a UHR alagaria uma área muito pequena, o que significa também menores emissões de CO₂ pelo tamanho menor dos reservatórios, e não haveria interferências no meio hídrico, visto que a usina operaria em circuito fechado. Nesse caso, as interferências à jusante também seriam mínimas. O local escolhido pela equipe da Eletronorte auxilia na minimização dos impactos negativos, uma vez que estudos preliminares já apontaram condições favoráveis ao aproveitamento reversível. A proximidade com a UHE Curuá-Una facilita a transmissão da energia gerada pela UHR, o que diminui as perdas de energia e evita a instalação de novas linhas de transmissão.

Prosseguindo-se com as análises, seguem na Tabela 8 os resultados para o meio biótico:

Tabela 8 – Resultados obtidos para o meio biótico

Colaborador	Flora	Fauna	Meio Biótico
Colaborador 1	0,16	0,25	0,40
Colaborador 2	0,18	0,35	0,52
Colaborador 3	0,09	0,15	0,25
Colaborador 4	0,19	0,20	0,39
Colaborador 5	0,40	0,18	0,58
Colaborador 6	0,22	0,20	0,43
Colaborador 7	0,19	0,23	0,42
Colaborador 8	0,20	0,31	0,51
Colaborador 9	0,18	0,21	0,39
Colaborador 10	0,15	0,23	0,38
Colaborador 11	0,19	0,37	0,56
Colaborador 12	0,29	0,35	0,64
Colaborador 13	0,22	0,23	0,45
Colaborador 14	0,21	0,23	0,43
Colaborador 15	0,14	0,10	0,24
Colaborador 16	0,21	0,22	0,43
Colaborador 17	0,08	0,26	0,34
Colaborador 18	0,31	0,41	0,72

Tabela 8 – Resultados obtidos para o meio biótico

Colaborador	Flora	Fauna	Meio Biótico
Colaborador 19	0,10	0,14	0,24
Colaborador 20	0,14	0,23	0,37
Colaborador 21	0,18	0,20	0,38
Colaborador 22	0,09	0,15	0,24
Colaborador 23	0,14	0,09	0,22
Colaborador 24	0,18	0,27	0,45
Colaborador 25	0,13	0,12	0,24
Colaborador 26	0,17	0,19	0,35
Colaborador 27	0,19	0,28	0,47
Colaborador 28	0,14	0,17	0,31
Colaborador 29	0,18	0,22	0,40
Colaborador 30	0,05	0,05	0,10
Média	0,18	0,22	0,39

Na Tabela 8, os dados para os impactos à flora e fauna já estão multiplicados pelos seus respectivos pesos ou indicadores. A última coluna mostra o somatório obtido para o meio biótico, sem multiplicar pelo seu respectivo peso. A nota média final para o meio biótico foi de 0,39, nota que corresponderia à classificação entre “ruim” e “pouco ruim”, de acordo com a Tabela 5 (página 68). O meio biótico, então, apresenta mais impactos negativos, na opinião dos colaboradores, do que o meio físico. O meio biótico é, geralmente, mais sensível às interferências humanas, e em um cenário inserido no bioma Amazônico, onde a biodiversidade é imensa, o resultado do meio biótico pode até ser considerado como satisfatório, para um projeto de usina reversível. Há que se considerar, também, que só o fato de se tratar da Amazônia já se configura como uma situação em que as pessoas tendem a ser mais rigorosas em suas avaliações.

Algumas características do cenário de Curuá-Una podem ter contribuído para a classificação não tão negativa do meio biótico, como o fato de a tecnologia ser amigável aos peixes. Além disso, a UHR seria implementada dentro da área de concessão da UHE Curuá-Una, ou seja, a área já foi alterada e já convive com a interferência antrópica, pela presença da hidrelétrica. Também, pela área de concessão, segundo a ANEEL (2001), é de responsabilidade da concessionária o atendimento à legislação ambiental, respondendo pelas consequências de um eventual descumprimento. Esse respaldo legal garante uma certa segurança quanto à questão da preservação do bioma Amazônico dentro da área de concessão da Eletronorte.

Apesar disso, a Amazônia é um ecossistema frágil. A floresta vive a partir de seu próprio material orgânico, e seu delicado equilíbrio é extremamente sensível a quaisquer interferências. Os danos causados pela ação antrópica são muitas vezes irreversíveis (MMA, S/d). Por essa razão, a avaliação deve ser muito mais criteriosa, conhecendo-se a fundo o ecossistema local e as consequências da interferência humana, a fim de se evitar e mitigar todos os impactos possíveis.

Dando prosseguimento às análises, seguem abaixo na Tabela 9 os resultados dos meios antrópico e legislativo:

Tabela 9 – Resultados dos meios antrópico e legislativo

Colaborador	Ser Humano	Culturais	Meio Antrópico	Meio Legislativo
Colaborador 1	0,26	0,30	0,56	0,52
Colaborador 2	0,39	0,17	0,56	0,51
Colaborador 3	0,34	0,24	0,58	0,54
Colaborador 4	0,19	0,27	0,45	0,55
Colaborador 5	0,38	0,22	0,60	0,61
Colaborador 6	0,29	0,20	0,49	0,45
Colaborador 7	0,22	0,09	0,32	0,56
Colaborador 8	0,46	0,28	0,74	0,58
Colaborador 9	0,28	0,22	0,50	0,55
Colaborador 10	0,26	0,22	0,48	0,59
Colaborador 11	0,40	0,30	0,70	0,51
Colaborador 12	0,39	0,25	0,64	0,36
Colaborador 13	0,15	0,36	0,51	0,60
Colaborador 14	0,25	0,27	0,51	0,44
Colaborador 15	0,19	0,25	0,44	0,37
Colaborador 16	0,27	0,28	0,55	0,43
Colaborador 17	0,25	0,22	0,47	0,57
Colaborador 18	0,38	0,44	0,82	0,59
Colaborador 19	0,21	0,22	0,43	0,52
Colaborador 20	0,23	0,22	0,45	0,39
Colaborador 21	0,26	0,22	0,48	0,44
Colaborador 22	0,21	0,20	0,42	0,48
Colaborador 23	0,24	0,28	0,52	0,36
Colaborador 24	0,22	0,17	0,40	0,41
Colaborador 25	0,18	0,17	0,36	0,52
Colaborador 26	0,27	0,20	0,47	0,41
Colaborador 27	0,32	0,36	0,68	0,45
Colaborador 28	0,21	0,19	0,40	0,45
Colaborador 29	0,37	0,28	0,65	0,45

Tabela 9 – Resultados dos meios antrópico e legislativo

Colaborador	Ser Humano	Culturais	Meio Antrópico	Meio Legislativo
Colaborador 30	0,24	0,22	0,46	0,38
Média	0,28	0,24	0,52	0,49

Na Tabela 9, os dados para os impactos ao ser humano e aos aspectos culturais já estão multiplicados pelos seus respectivos pesos ou indicadores. A penúltima coluna mostra o somatório obtido para o meio antrópico, sem multiplicar pelo seu respectivo peso. O meio legislativo possui apenas 1 (uma) categoria, portanto os dados da Tabela 9 estão apresentados sem multiplicar pelo indicador do meio. A nota média final para o meio antrópico foi de 0,52, nota que corresponde à classificação entre “indiferente” e “pouco bom”, de acordo com a Tabela 5 (página 68). Já a nota média final para o meio legislativo foi de 0,49, nota que corresponderia à classificação entre “pouco ruim” e “indiferente”, de acordo com a Tabela 6. Nota-se, então, que dentre todos os meios avaliados, o meio antrópico foi o que apresentou os melhores resultados. Isso se deve ao fato de que a proposta de implantação da UHR não tem interferência populacional, uma vez que não há ocupação humana no local do estudo. Em relação aos aspectos culturais, a proposta da Eletronorte não traz informações sobre a possível presença de recursos arqueológicos no local. Por conta disso, uma sondagem mais criteriosa deveria ser feita, a fim de checar a possível existência de patrimônios arqueológicos, o que certamente diminuiria a nota do meio antrópico.

O meio legislativo apresentou resultados, de certa forma, conservadores para a implantação de uma UHR em Curuá-Una. Em termos regulatórios de energia e de combate à emissão de GEE proveniente das termelétricas, as UHRs desempenham um papel muito importante no cenário energético do país, principalmente na região Norte, onde o planejamento da expansão do sistema de geração de energia do Brasil tem sido feito preponderantemente com base na construção de hidrelétricas a fio d’água (FIRJAN, 2013). A opção por usinas a fio d’água, combinada com as características geográficas e hidrográficas dessa região, poderá levar à construção de usinas com menor fator de capacidade e à diminuição do ritmo de crescimento da energia armazenada nos reservatórios do Sistema Interligado Nacional. Mais usinas a fio d’água hoje, maior necessidade de termelétricas na base amanhã, o que resultará tanto em um aumento na emissão de GEE como em elevação do custo de geração de energia. Esse maior custo, por sua vez, será inevitavelmente repassado às tarifas pagas pelo consumidor final,

impactando assim a competitividade do país (FIRJAN, 2013). Logo, é nítida a relevância do aumento da capacidade de armazenamento de energia no país, onde entra a tecnologia das UHRs. Por conta disso, esperava-se resultados mais positivos na avaliação do meio legislativo. Acredita-se que a falta de divulgação acerca dos benefícios do armazenamento de energia pode ter contribuído para o resultado do meio em questão.

Tendo a nota de todos os meios, multiplicou-se essas notas por cada respectivo indicador e, assim, obteve-se a nota média final para a UHR proposta no estudo de caso de Curuá-Una, conforme segue na Tabela 10:

Tabela 10 – Resultado final para a UHR de Curuá-Una

Colaborador	FÍSICO	BIÓTICO	ANTRÓPICO	LEGISLATIVO	TOTAL
Colaborador 1	0,14	0,10	0,13	0,14	0,51
Colaborador 2	0,13	0,14	0,13	0,14	0,53
Colaborador 3	0,12	0,06	0,13	0,11	0,46
Colaborador 4	0,11	0,10	0,10	0,15	0,46
Colaborador 5	0,14	0,15	0,13	0,16	0,59
Colaborador 6	0,12	0,11	0,11	0,12	0,46
Colaborador 7	0,11	0,11	0,07	0,15	0,44
Colaborador 8	0,16	0,13	0,17	0,15	0,61
Colaborador 9	0,12	0,10	0,11	0,15	0,48
Colaborador 10	0,13	0,10	0,11	0,16	0,49
Colaborador 11	0,13	0,14	0,16	0,14	0,57
Colaborador 12	0,16	0,17	0,14	0,10	0,57
Colaborador 13	0,15	0,12	0,11	0,15	0,55
Colaborador 14	0,10	0,11	0,12	0,12	0,45
Colaborador 15	0,07	0,06	0,10	0,10	0,33
Colaborador 16	0,11	0,11	0,12	0,12	0,46
Colaborador 17	0,12	0,09	0,10	0,15	0,46
Colaborador 18	0,20	0,19	0,18	0,16	0,73
Colaborador 19	0,10	0,06	0,10	0,14	0,39
Colaborador 20	0,16	0,10	0,10	0,11	0,46
Colaborador 21	0,11	0,10	0,11	0,12	0,43
Colaborador 22	0,10	0,06	0,09	0,13	0,38
Colaborador 23	0,08	0,06	0,12	0,10	0,35
Colaborador 24	0,13	0,12	0,09	0,11	0,45
Colaborador 25	0,09	0,06	0,07	0,14	0,38
Colaborador 26	0,10	0,09	0,11	0,11	0,41
Colaborador 27	0,14	0,12	0,15	0,12	0,53
Colaborador 28	0,08	0,08	0,09	0,12	0,37

Tabela 10 – Resultado final para a UHR de Curuá-Una

Colaborador	FÍSICO	BIÓTICO	ANTRÓPICO	LEGISLATIVO	TOTAL
Colaborador 29	0,14	0,10	0,15	0,12	0,50
Colaborador 30	0,09	0,03	0,10	0,10	0,32
Média	0,12	0,10	0,12	0,13	0,47

A nota média final para a UHR foi, então, de 0,47, nota que corresponde à classificação entre “pouco ruim” e “indiferente”, de acordo com a Tabela 5 (página 68). Essas classificações podem trazer algumas interpretações:

- ou não há impactos negativos significantes;
- ou não há impactos positivos significantes;
- ou parte dos avaliadores não tinha pleno conhecimento da tecnologia proposta, e optaram por não se envolver na questão.

Ora, se não há impactos negativos significantes, esse é um ponto satisfatório do empreendimento. Porém, se também não há impactos positivos significantes, abre-se a discussão da relevância da obra. Dessa forma, fica a necessidade de realizar estudos mais completos e profundos sobre a importância do empreendimento, os benefícios que o mesmo traria para a região e quais são de fato os impactos positivos, a fim de maximizá-los. O mesmo deve ser feito com os impactos negativos, a fim de minimizá-los e compensá-los de forma satisfatória. Também se faz necessário realizar um trabalho de esclarecimento à comunidade acerca dos benefícios e dos impactos, tanto positivos como negativos, do armazenamento de energia e da própria tecnologia de usinas reversíveis.

A Figura 17 resume os resultados obtidos pelo método quantitativo desenvolvido aplicado ao estudo de caso de Curuá-Una.

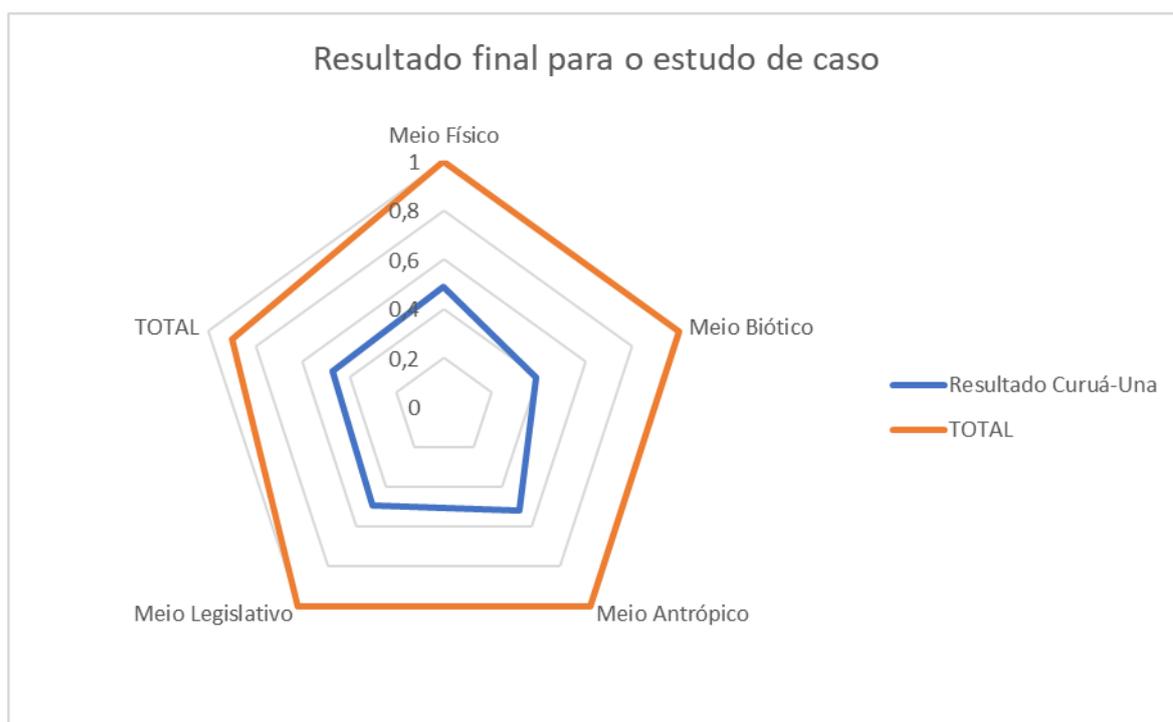


Figura 17 – Resultados finais para o estudo de caso analisado

A linha em azul representa os resultados obtidos para o estudo de caso avaliado. A linha em laranja representa a nota máxima possível de ser obtida pela planilha.

Como já comentado anteriormente, o meio biótico foi o meio que apresentou os resultados mais negativos, seguido pelos meios físico e legislativo, que ficaram na faixa dos 0,5, e o meio antrópico, que apresentou resultados mais positivos. Então, numa eventual implantação de uma usina reversível no cenário de Curuá-Una, o empreendimento e sua equipe devem se atentar mais ao meio biótico, bem como propor soluções para a proteção adequada do ecossistema. Um maior esclarecimento acerca dos benefícios das UHRs também deve ser considerado para melhorar sua imagem, principalmente quanto ao quesito da legislação. Estudos mais detalhados no meio físico podem ajudar a esclarecer quais impactos realmente aconteceriam no local, e auxiliar na mitigação dos mesmos.

6.3. Definição da incerteza da amostragem e limitações do método

O tamanho da população (N) considerado foi de 72 alunos de pós-graduação em Engenharia de Energia, valor obtido através da secretaria de pós-graduação. Sendo assim, obteve-se um valor de 42 para o tamanho da amostra, utilizando-se as Equações 4 e 5. O perfil dos alunos de pós-

graduação que aderiram à pesquisa é formado, em sua grande maioria, por engenheiros ambientais, mecânicos, hídricos e de energia.

Portanto, para se obter um erro de 10%, uma quantidade de 42 questionários deveriam ser respondidos. Porém, apenas 36 questionário foram entregues na primeira etapa, e 30 na segunda etapa. Fazendo-se os cálculos inversos, para uma população de 72 alunos, a incerteza para uma quantidade de 36 questionários respondidos na primeira etapa foi igual a 11,78%. Para uma quantidade de 30 questionários respondidos, na segunda etapa, a incerteza foi de 13,9%.

A pesquisa, então, não atingiu o erro amostral estipulado de 10%. Porém, os erros encontrados não tiram sua credibilidade, uma vez que estão entre 10% e 15%. Deve-se levar em conta, também, que a pesquisa foi realizada de forma a testar a aplicabilidade de um método, acerca de um empreendimento proposto por um estudo de caso, ou seja, o empreendimento ainda não é concreto.

Em se tratando das limitações do método, as características da análise quantitativa desenvolvida nessa dissertação se assemelham a outros métodos, como o Battelle-Columbus, já comentado aqui anteriormente, e portanto traz limitações semelhantes. A subjetividade é a principal, ou seja, o método é baseado na opinião da população amostrada, que traz consigo suas próprias formas de entendimento e conhecimento acerca dos impactos ambientais e seus próprios conhecimentos prévios. Além disso, o método também não consegue expressar as interações entre os impactos, avaliando-os de forma isolada. Como já visto anteriormente nessa dissertação, existem várias classificações de impactos ambientais, como quanto à magnitude, duração, alcance, reversibilidade, entre outros. O presente método conseguiu classificar os impactos apenas em termos de magnitude, na primeira etapa, e quanto ao tipo (positivo ou negativo) na segunda etapa.

Entretanto, tais limitações são inerentes ao processo de avaliação de impactos ambientais. É praticamente impossível se ter um único método capaz de avaliar completamente cada impacto, promovendo interações e análises livres de qualquer subjetividade. Por causa disso, é importante utilizar as ferramentas adequadas para a avaliação dos impactos, escolhendo métodos complementares, além de considerar uma equipe multidisciplinar para a confecção da AIA, de modo que cada profissional possa contribuir com seus conhecimentos prévios e sua percepção.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O armazenamento de energia se configura hoje como uma peça chave para o futuro do cenário energético brasileiro. A crescente demanda por energia e a necessidade de medidas de combate ao aquecimento global faz com que o uso de termelétricas para atendimento da demanda de ponta não seja mais tolerável. Nesse sentido, o armazenamento de energia deve ser suprido, então, por fontes renováveis e limpas. Assim, as UHRs se tornam fundamentais para o equilíbrio entre o fornecimento de eletricidade confiável e o desenvolvimento sustentável.

O presente trabalho concluiu, de forma satisfatória, a análise ambiental das UHRs, tanto na confecção do *check-list* quanto na aplicação do método quantitativo. Em relação ao *check-list*, espera-se que o mesmo seja útil para o desenvolvimento de avaliações de impactos ambientais futuras dos novos empreendimentos de UHRs que o Brasil possa empreender. Em relação ao método desenvolvido, o mesmo apresenta suas limitações, como qualquer método de avaliação de impactos ambientais, mas pode servir como ponto de partida para AIAs mais completas, aliado com outras ferramentas de análise ambiental existentes. Em relação ao estudo de caso para a implantação de uma UHR em Curuá-Una, o método pode ser considerado satisfatório para uma análise ambiental inicial, visto que possui suas limitações, já discutidas, e sua incerteza de amostragem. O empreendimento de Curuá-Una obteve nota final igual a 0,47 que, como já discutido, não representa nem impactos positivos significantes nem impactos negativos significantes. Por essa razão, a proposta de projeto deve ser revisada, a fim de potencializar os impactos positivos e minimizar os negativos, levando-se em conta também os resultados obtidos para cada meio, como no caso do meio biótico, que necessita de maior atenção.

Quanto aos impactos ambientais das UHRs em si, o presente trabalho mostrou que essa tecnologia apresenta grandes vantagens em relação às usinas hidrelétricas convencionais, como menor área alagada, o que se traduz em menores emissões de CO₂ e menor interferência no ecossistema e meio antrópico; influência mínima no regime fluvial da bacia hidrográfica, pois uma vez cheios os reservatórios, não há necessidade de grandes reposições de água; possibilidade de construção próxima aos centros de carga (desde que haja disponibilidade geográfica), o que diminui as perdas e evita a instalação de novas linhas de transmissão; benefícios ao meio biótico pois, em alguns estudos já citados, os reservatórios das usinas reversíveis apresentaram maior biodiversidade do que no próprio rio; além da grande vantagem de substituição às termelétricas e redução da intermitência das fontes renováveis, o que se

configura em um enorme ganho ambiental, pois reduz as emissões de gases de efeito estufa e ainda estimula a produção de energias limpas.

Por outro lado, as alterações no meio hídrico, com as frequentes variações de nível e fluxo da água, decorrentes das operações de bombeamento e turbinamento, são impactos intrínsecos às UHRs, e devem ser avaliados e observados com maior rigor, levando-se em conta as características do meio onde será implementada a usina reversível; o mesmo se aplica aos impactos na qualidade da água e no solo, bem como os impactos de construção, onde a instalação das tubulações subterrâneas também podem trazer impactos negativos significantes, dependendo do local. O meio biótico deve ser avaliado criteriosamente, a fim de se mitigar ao máximo os impactos que podem ser causados, como a supressão de áreas florestais, mortandade de peixes e perturbação da fauna e flora local, com a construção e operação da UHR.

A chave para a avaliação de impactos ambientais é encontrar um local que ocasione menos impactos, levando em conta a sensibilidade do meio. Locais onde a implantação do empreendimento levará a grandes perdas ecológicas, arqueológicas, culturais ou ao deslocamento massivo da população local e sua total desestruturação, não justificam a obra. O desenvolvimento tecnológico para fins de suprimento energético não deve transpor as barreiras ambientais, pois se isso ocorrer, o desequilíbrio ao desenvolvimento sustentável se torna inviável.

Por fim, espera-se que o governo brasileiro leve adiante seus planos para retomada do conceito das UHRs no país, levando em conta os inúmeros benefícios dessa tecnologia para a regulamentação e estabilidade do setor elétrico.

7.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, menciona-se a elaboração de estudos acerca das barreiras regulatórias e econômicas das usinas reversíveis, que juntamente com a questão ambiental, constituem-se como entraves à retomada dessa tecnologia no Brasil. Outros estudos, no âmbito do armazenamento de energia, podem ser desenvolvidos, como a análise comparativa das UHRs com outros sistemas de armazenamento em larga escala, ou com as baterias, que são os sistemas mais utilizados atualmente. Outra possibilidade é realizar análises sobre as

interações entre UHRs e fontes renováveis, como a eólica e a solar, e a possibilidade de instalação de sistemas híbridos.

8. PRODUÇÃO ACADÊMICA

A seguir, apresenta-se a produção acadêmica obtida pela autora dessa dissertação, durante o período do Mestrado em Engenharia de Energia (2017-2019):

- RAIMUNDO, Danielle Rodrigues; PEDREIRA, Juliano Romanzini; SOUSA, Lays Camila; CÓRDOVA, Maxi Estefany Huamán; MIRANDA, Rosana Teixeira. **Estudo da viabilidade econômica e da produção energética do biogás gerado no tratamento de efluentes, aplicados à cidade de Pouso Alegre - MG.** Revista Brasileira de Energia Renováveis, v. 6, p. 995-1016, 2017.
- RAIMUNDO, Danielle Rodrigues; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; BARROS, Regina Mambeli. **Evaluation of greenhouse gas emissions avoided by wind generation in the brazilian energetic matrix: a retroactive analysis and future potential.** Resources, Conservation and Recycling, v. 137, p. 270-280, 2018.
- RAIMUNDO, Danielle Rodrigues; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio. **Pumped Hydroelectric Energy Storage Systems (PHES): challenges and perspectives in the Brazilian energy scenario.** American Journal of Hydropower, Water and Environment Systems, v. 6, p. 6 – 9, 2018.

9. REFERÊNCIAS

ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS. **Pumped Hydro Storage – The Ups and Downs of Water**. 2019. Disponível em: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/pumped-hydro-storage.html> < Último acesso em: 24/04/2019.

ALVA, G.; LIN, Y.; FANG, G. **An overview of thermal energy storage systems**. Energy, v. 144, p. 341 – 378, 2018.

ALVA, G.; LIU, L.; HUANG, X.; FANG, G. **Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 68, p. 693 – 706, 2017.

ALVARENGA, M. I. N. **Aula 4: estudo de impacto ambiental**. Universidade Federal de Itajubá. Curso de Engenharia Ambiental. 2014. Apresentação em PowerPoint®. Acervo pessoal da autora.

AMORIM, E. L. C. **Avaliação de impactos ambientais: conceitos, estudo de impacto ambiental e relatório de impacto sobre o meio ambiente**. Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia (CTEC). 2018. Apresentação em PowerPoint®.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Contrato de concessão nº 107 /2001. PROCESSO Nº 48100.001142/96-17.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/10184//15062820//Contrato+de+Concessão.pdf> < Último acesso em: 24/04/2019.

ARANI, A. A. K.; KARAMI, H.; GHAREHPETIAN, G. B.; HEJAZI, M. S. A. **Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 69, p. 9 – 18, 2017.

ARÁNTGUI, R. L. **Pumped-hydro energy storage: potential for transformation from single dams**. Analysis of the potential for transformation of non-hydropower dams and reservoir hydropower schemes into pumping hydropower schemes in Europe. JRC Scientific and Technical Reports, 2012.

BAKKEN, T. H. **Environmental impacts of pumped storage hydropower plants: Norwegian perspectives**. SINTEF Energy Research & CEDREN, 2011. Apresentação em PowerPoint®.

BARBETTA, P. A. **Estatística Aplicada às Ciências Sociais**. 5ª edição. Florianópolis. Editora da UFSC, 2004.

BARBIERI, J. C. **Gestão Ambiental Empresarial: Conceitos, Modelos e Instrumentos**. 2ª edição. São Paulo. Editora Saraiva, 2007.

BARBOUR, E.; WILSON, I. A. G.; RADCLIFFE, J.; DING, Y.; LI, Y. **A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 61, p. 421 - 432, 2016.

BELLIDO, M. H. **Microrredes elétricas e armazenamento de energia**. 3º Seminário de Inserção de Novas Fontes Renováveis e Redes Inteligentes no Planejamento Energético Nacional, 2016. Apresentação em PowerPoint®.

BEN. **Balanco Energético Nacional**. Relatório Síntese, ano base 2017. Empresa de Pesquisa Energética, 2018.

BONALUMI, M.; ANSELMETTI, F. S.; KAEGI, R.; WÜEST, A. **Particle dynamics in high-Alpine proglacial reservoirs modified by pumped-storage operation**. *Water Resources Research*, v. 47, p. 1 – 15, 2011.

BRASIL. **Política Nacional do Meio Ambiente**. Lei nº 6938/81, de 31 de Agosto de 1981.

CANALES, F. A.; BELUCO, A.; MENDES, C. A. B. **Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas**. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental (REGETA)*, v. 19, p. 1230 – 1249, 2015.

CARMO, V. **O uso de questionários em trabalhos científicos**. UFSC, 2013. Disponível em: >http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/Ensino_2013_2/O_uso_de_questionarios_em_trabalhos_cient%edficos.pdf< Último acesso em: 24/04/2019.

CASTRO, N.; BRANDÃO, R.; CATOLICO, A. C. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis: novas possibilidades para o Setor Elétrico Brasileiro**. Agência Canal Energia, 2018. Disponível em: >http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/02_castro180.pdf< Último acesso em: 24/04/2019.

CERPCH. **Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas**. 2017. Disponível em: >http://www.cerpch.org/cerpch/front_end/cerpch.php< Último acesso em: 24/04/2019.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 001, de 23 de Janeiro de 1986.** Disponível em: ><https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>< Último acesso em: 24/04/2019.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 237, de 19 de Dezembro de 1997.** Disponível em: ><http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res97/res23797.html>< Último acesso em: 17/06/2019.

COSTA, B. M. P. A.; PEREIRA, S. F. P.; OLIVEIRA, A. F. S.; FREITAS, K. H. G.; SILVA, C. S.; SANTOS, L. P.; ROCHA, R. M.; OLIVEIRA, G. R.; SILVA, T. M. **Influência da sazonalidade nos parâmetros químicos e físico-químicos da UHE de Curuá-Una Santarém - PA.** 57º Congresso Brasileiro de Química – Gramado (RS). 23 a 27 de Outubro de 2017.

COUTO, J. R. C. de S. **Armazenamento de Energia.** Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

CREMONEZ, F. E.; CREMONEZ, P. A.; FEROLDI, M.; CAMARGO, M. P.; KLAJN, F. F.; FEIDEN, A. **Avaliação de impacto ambiental: metodologias aplicadas no Brasil.** Revista Monografias Ambientais – REMOA, v.13, n.5, p. 3821 – 3830, 2014.

DMITRIEVA, I. L.; MAKAREVICH, T. F.; MIKOTS, L. M. **Ecological aspects of operating a pumped-storage station.** Hydrotechnical Construction, v. 26, p. 557 – 559, 1992.

ELETRONORTE (a). Eletrobras Eletronorte. **Perfil e Estrutura.** S/d. Disponível em: ><http://www.eletronorte.gov.br/opencms/opencms/aEmpresa/>< Último acesso em: 24/04/2019

ELETRONORTE (b). Eletrobras. **Pará.** S/d Disponível em: ><http://www.eletronorte.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/estados/para/>< Último acesso: 31/07/2018

ELETRONORTE. **Sistema de Armazenamento de energia via Pequenas Centrais Hidrelétricas Reversíveis combinadas com Centrais Hidrelétricas de Ultrabaixa Queda.** Proposta de Projeto P&D, 2018.

ESA. **Energy Storage Association.** 2018. Disponível em : ><http://energystorage.org/energy-storage-1>< Último acesso: 30/07/2018

FARINACCIO, A.; TESSLER, M. G. **Avaliação de Impactos Ambientais no Meio Físico decorrentes de Obras de Engenharia Costeira - Uma Proposta Metodológica**. Revista da Gestão Costeira Integrada, v. 10, p. 419 – 434, 2010.

FERREIRA, T. V. B. **Usinas Reversíveis: Perspectivas no Setor Elétrico Brasileiro**. X Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas e Usinas Reversíveis. EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2016. Apresentação em PowerPoint®.

FIRJAN. Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. **A Expansão das Usinas a Fio d'Água e o Declínio da Capacidade de Regularização do Sistema Elétrico Brasileiro**. Diretoria de Desenvolvimento Econômico e Associativo. Gerência de Competitividade Industrial e Investimentos. 2013.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energias renováveis: um futuro sustentável**. Revista USP, São Paulo, n.72, p. 6 - 15, 2007.

GONÇALVES, L. M. **Dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia para cenários de contingência**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energias. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2014.

GRAMULIA JUNIOR, J. **Contribuição da Usina Hidroelétrica de Henry Borden para o Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência**. Dissertação de Mestrado. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas Curso de Pós-Graduação em Energia. Universidade Federal do ABC, 2009.

GUNEY, M. S.; TEPE, Y. **Classification and assessment of energy storage systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 75, p. 1187-1197, 2017.

GURUNG, A. B.; BORSDORF, A.; FÜREDER, L.; KIENAST, F.; MATT, P.; SCHEIDEGGER, C.; SCHMOCKER, L.; ZAPPA, M.; VOLKART, K. **Rethinking Pumped Storage Hydropower in the European Alps**. International Mountain Society, 2016.

GUTIÉRREZ, M. G.; ARÁNTEGUI, R. L. **Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage based on two existing reservoirs**. Renewable Energy, v. 75, p. 856 – 868, 2015.

HADJPASCHALIS, I.; POULLIKKAS, A.; EFTHIMIOU, V. **Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, p. 1513 – 1522, 2009.

- HALL, P. J.; BAIN, E. J. **Energy-storage technologies and electricity generation**. Energy Policy, v. 36, p. 4352-4355, 2008.
- HANSEN, L. S.; HELLAND, I. P. **Impacts of pumped storage hydropower on the ecosystem of reservoirs**. NINA, 2012. Apresentação em PowerPoint®.
- HARRIS, V. **Análise multicriterial na determinação de sítios potenciais para aproveitamentos hidrelétricos reversíveis**. Dissertação de Mestrado. UNICAMP. Faculdade de Engenharia Civil. Departamento de Hidráulica e Saneamento. 1992.
- HUNT, J. D.; FREITAS, M. A. V.; JÚNIOR, A. O. P. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis Sazonais no Rio São Francisco: aumentando o armazenamento energético e diminuindo a evaporação**. Sustentabilidade em Debate, v. 7, p. 18 - 33, 2016.
- HUNT, J. D. **Estado da Arte das Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Mundo**. Instituto Virtual Internacional de Mudanças Climáticas (IVIG), 2016. Apresentação em PowerPoint®.
- HUNT, J. D.; ADELAIDE, M. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis Sazonais: Benefícios para o Brasil**. Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, 2016. Apresentação em PowerPoint®.
- IEEE. **Capturing Grid Power**. IEEE power & energy magazine, p. 33 – 41, 2009.
- KEAR, G.; CHAPMAN, R. **“Reserving judgement”: Perceptions of pumped hydro and utility-scale batteries for electricity storage and reserve generation in New Zealand**. Renewable Energy, v. 57, p. 249 – 261, 2013.
- KONG, Y.; KONG, Z.; LIU, Z.; WEI, C.; ZHANG, J.; AN, G. **Pumped storage power stations in China: The past, the present, and the future**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 71, p. 720 – 731, 2017.
- LEE, J. W. **The contribution of foreign direct investment to clean energy use, carbon emissions and economic growth**. Energy Policy, v. 55, p. 483 – 489, 2013.
- LUO, X.; WANG, J.; DOONER, M.; CLARKE, J. **Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation**. Applied Energy, v. 137, p. 511 – 536, 2015.
- MARIANO, M. de O. C. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis: considerações sobre rebaixamento rápido na estabilidade de taludes**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017.

MARTÍN, J. I. S.; ZAMORA, I.; MARTÍN, J. J. S.; APERRIBAY, J.; EGUIA, P. **Energy Storage Technologies for Electric Applications**. Department of Electrical Engineering - University of the Basque Country. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2011.

MAYER, F. P. **Introdução à Estatística e conceitos de amostragem**. Laboratório de Estatística e Geoinformação (LEG). Departamento de Estatística (DEST). Universidade Federal do Paraná (UFPR). 2016. Apresentação em PowerPoint®.

MIRANDA, A. M. V. **Tecnologias de Armazenamento de Energia – Identificação do Potencial e Aplicações**. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Amazônia**. S/d. Disponível em: ><http://www.mma.gov.br/biomas/amazonia.html>< Último acesso em: 24/04/2019.

MOROZ, S.; FINK, M.; MOREN-ABAT, M. **What are the environmental effects of Pumped Hydro Energy Storage (PHES) and how can future development proceed?** Intelligent Energy Europe. 2013. Apresentação em PowerPoint®.

NAZARI, M. E.; ARDEHALI, M. M.; JAFARI, S. **Pumped-storage unit commitment with considerations for energy demand, economics, and environmental constraints**. Energy, v. 35, p. 4092 – 4101, 2010.

NOTSUE, A. S. **Guidelines for Design - Pumped Storage Hydro**. S/d. Disponível em: ><https://pt.scribd.com/document/367506427/3-Guidelines-for-Design-Pumped-Storage-Hydro>< Último acesso em: 30/07/2018.

OBERHOFER, A. **Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration**. Global Energy Network Institute (GENI), 2012.

PASTEN, C.; SANTAMARINA, J. C. **Energy Geo-Storage – Analysis and Geomechanical Implications**. Journal of Civil Engineering, v. 15, p. 655 - 667, 2011.

PATINO, C. M.; FERREIRA, J. C. **Intervalos de confiança: uma ferramenta útil para estimar o tamanho do efeito no mundo real**. Jornal Brasileiro de Pneumologia, v. 41, p. 565 – 566, 2015.

PATOCKA, F. **Environmental Impacts of Pumped Storage Hydro Power Plants**. Norwegian University of Science and Technology. Department of Hydraulic and Environmental Engineering, 2014

PDE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2017.

PEREIRA, A. M. G. **Water Pumped Storage Environmental Impact Assessment in São Miguel Island**. Assessment between Freshwater Use and Seawater Use. Universidade Técnica de Lisboa, S/d.

PIMENTEL, G.; PIRES, S. H. **Metodologias de avaliação de impacto ambiental: aplicações e seus limites**. Revista de Administração Pública, v, 26, p. 56 – 58, 1992.

PRASAD, A. D.; JAIN, K.; GAIROLA, A. **Pumped Storage Hydropower Plants Environmental Impacts using Geomatics Techniques: An Overview**. International Journal of Computer Applications, v. 81, 2013.

QUEIROZ, R.; GRASSI, P.; LAZZARE, K.; KOPPE, E.; TARTAS, B. R.; KEMERICH, P. D. **C. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais**. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET, v. 13, p. 2774 – 2784, 2013.

RICETTA, M. R. A. M. A.; OHNUMA JÚNIOR, A. A.; FORTES, J. D. N. **Usinas hidrelétricas reversíveis e o nexo água e energia**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília – DF. 2015.

ROHIT, A. K.; RANGNEKAR, S. **An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: Part II – energy storage applications, benefits and market potential**. Journal of Energy Storage, v. 13, p. 447 – 456, 2017.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de Impacto Ambiental: Conceitos e Métodos**. 2ª edição. São Paulo. Oficina de Textos, 2013.

SANTOS, I. D. C. **A avaliação de impacto ambiental e a responsabilidade do brasil diante da degradação ao meio ambiente**. Revista Interfaces Científicas – Direito, v.1, p. 67-74, 2013.

SIL, A. C. **As usinas reversíveis estão chegando**. Brasil Energia. Rio de Janeiro, 03 de janeiro de 2017.

SILVA, B. F. G. **Estudo de Soluções Alternativas de Armazenamento de Energia para Diferentes Horizontes Temporais**. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

SILVA, L. J.; PARENTE, V. **As usinas hidrelétricas reversíveis fazem sentido no Brasil?** XI CBPE – Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Cuiabá - MT, 11 a 14 de Setembro de 2018. Disponível em: >https://www.xicbpe.com.br/_down_artigos/320.pdf< Último acesso em: 16/06/2019

SILVA, Y. F. F. C.; BORTONI, E. C. **Sistemas de armazenamento de energia elétrica em redes inteligentes: características, oportunidades e barreiras**. Revista Brasileira de Energia, v. 22, p. 48 – 73, 2016.

SOUSA, W. L. **Impacto ambiental de hidrelétricas: uma análise comparativa de duas abordagens**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Planejamento Energético, 2000.

TIAGO FILHO, G. L. **Centrais Hidrelétricas Reversíveis: Combinando Eólica com Hidrelétricas**. Novas Tecnologias Para Energia Eólica, 2016. Apresentação em PowerPoint®.

VASCONCELOS, Y. **Usinas Versáteis: Reaproveitar água em hidrelétrica eleva o abastecimento e o fornecimento de eletricidade para São Paulo e Baixada Santista**. Pesquisa FAPESP, Energia, 2015.

VENNEMAN, P.; THIEL, L.; FUNKE, H-C. **Pumped Storage Plants in the Future Power Supply System**. Hydropower in Future Energy Supply, 2010.

VIEIRA, M. de T.; BESSEGATO, L. F. **Elementos de Estatística: Noções de Amostragem**. Departamento de Estatística. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2013.

YANG, C.; JACKSON, R. B. **Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p. 839 - 844, 2011.

ZUCULIN, S.; PINTO, M. A. R. R. C.; BARBOSA, P. S. F.; TIAGO FILHO, G. L. **A Retomada do Conceito de Eficiência de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) no Setor Elétrico Brasileiro**. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento. Companhia Energética de São Paulo (CESP), 2014.

**APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE IMPACTOS AMBIENTAIS COM SEUS
RESPECTIVOS PESOS APLICADO PARA O ESTUDO DE CASO**

MEIO	PESO 1	PESO 2	IMPACTO AMBIENTAL	NOTA	PESO 3		
FÍSICO	0,25	0,24	IMPACTOS REFERENTES AO RESERVATÓRIO				
			Tamanho da área alagada		0,30		
			Influência no regime fluvial da bacia, uma vez cheios os reservatórios		0,27		
			Emissão de CO2, devido ao tamanho dos reservatórios		0,23		
					Alteração no clima da região, afetando o microclima local em termos de umidade do ar, regime de chuvas, evaporação e temperatura		0,20
							1,00
		0,21	IMPACTOS DE CONSTRUÇÃO				
			Construção da barragem e tubulações		0,41		
			Evita a instalação de novas linhas de transmissão		0,32		
					Exige a construção de comportas e casa de força abaixo do solo		0,27
							1,00
		0,20	IMPACTOS NO MEIO HÍDRICO				
			Mudanças nos recursos hídricos a longo prazo		0,09		
			Transformação do meio hídrico		0,08		
			Alteração da paisagem		0,09		
			Variação da zona litorânea permanentemente alagada dos reservatórios		0,08		
			Intensificação de processos erosivos e assoreamento do reservatório, com contaminação da água		0,08		
			Maior risco de erosão nas encostas e à jusante da barragem		0,08		
			Deslizamento de encostas		0,08		
			Modificação dos cursos de água		0,08		
Transposição de águas (pode ocorrer apenas para enchimento inicial dos reservatórios)			0,08				
			Possibilidade de reversão do fluxo do rio		0,08		

**APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE IMPACTOS AMBIENTAIS COM SEUS
RESPECTIVOS PESOS APLICADO PARA O ESTUDO DE CASO**

MEIO	PESO 1	PESO 2	IMPACTO AMBIENTAL	NOTA	PESO 3
			Variabilidade dos níveis de água à jusante da barragem		0,09
			Mudanças no nível da água mais rápidas e frequentes		0,09
					1,00
			IMPACTOS NA QUALIDADE DA ÁGUA		
			Mudanças na temperatura da água e na formação de gelo		0,06
			Presença de odores desagradáveis pela constante exposição da zona litorânea do reservatório na fase de bombeamento		0,07
			Transporte de sedimentos alterados		0,09
			Degradação da qualidade dos sedimentos		0,08
			Proliferação de macrófitas aquáticas		0,10
		0,18	Contaminação e eutrofização das águas		0,09
			Degradação da qualidade da água		0,09
			Redução na capacidade de autodepuração dos rios		0,09
			Mudanças no processo de estratificação térmica		0,09
			Redução do valor fertilizante da água efluente		0,08
			Aumento da matéria orgânica na água, o que pode diminuir o oxigênio dissolvido (diminuição DBO)		0,08
			Menor visibilidade da água pelo aumento da turbidez, causado pelo revolvimento de partículas do fundo do reservatório		0,08
					1,00
			IMPACTOS NO SOLO		
		0,17	Sismicidade induzida (principalmente pela construção de comportas e casas de forças abaixo do solo)		0,12

**APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE IMPACTOS AMBIENTAIS COM SEUS
RESPECTIVOS PESOS APLICADO PARA O ESTUDO DE CASO**

MEIO	PESO 1	PESO 2	IMPACTO AMBIENTAL	NOTA	PESO 3
			Mudança na capacidade de uso da terra e do solo		0,14
			Degradação de solos para construção da barragem		0,16
			Ocupação de áreas de terras		0,15
			Contaminação do solo pela acumulação de efluentes agrícolas e sanitários		0,14
			Ações para conservação do solo		0,15
			Instabilidade dos bancos de areia do reservatório		0,14
			Σ	1,00	
BIÓTICO	0,26	0,5	IMPACTOS NA FLORA		
			Impactos na produção biótica nas zonas litorâneas		0,13
			Perda da biodiversidade e afugentamento de espécies		0,15
			Perda de valor ambiental pela redução de serviços ecossistêmicos		0,14
			Impactos em áreas de interesse ecológico		0,15
			Supressão da vegetação e áreas florestais		0,15
			Fragmentação da paisagem		0,14
			Decomposição da biomassa submersa		0,14
				1,00	
		0,5	IMPACTOS NA FAUNA		
Perda de habitats			0,09		
		Risco de propagação de espécies entre os reservatórios, o que as tornaria exóticas		0,08	

**APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE IMPACTOS AMBIENTAIS COM SEUS
RESPECTIVOS PESOS APLICADO PARA O ESTUDO DE CASO**

MEIO	PESO 1	PESO 2	IMPACTO AMBIENTAL	NOTA	PESO 3
			Interrupção da migração de peixes		0,09
			Impedimento ao deslocamento da fauna aquática		0,09
			Presença de estruturas que impedem a migração de animais		0,08
			Alteração no padrão de alimentação das espécies das zonas litorâneas dos reservatórios		0,08
			Alterações na cadeia trófica		0,08
			Deslocamento de animais durante o enchimento dos reservatórios		0,09
			Alterações na composição da fauna		0,08
			Mortandade de peixes à jusante da barragem		0,08
			Alterações na composição da ictiofauna		0,08
			Mortalidade de espécies maiores		0,07
			Σ	1,00	
ANTRÓPICO	0,22	0,53	IMPACTOS AO SER HUMANO		
			Desapropriação de terras		0,09
			Proliferação de doenças, pela chegada de novos indivíduos (fase de construção)		0,07
			Presença de animais (perigo para o homem)		0,05
			Transferência compulsória da população afetada		0,07
			Problemas habitacionais durante a fase de construção da barragem		0,08
			Surgimento de choques entre a população local e o contingente alocado à construção		0,07
			Insegurança e incertezas em relação às futuras condições de vida		0,07

**APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE IMPACTOS AMBIENTAIS COM SEUS
RESPECTIVOS PESOS APLICADO PARA O ESTUDO DE CASO**

MEIO	PESO 1	PESO 2	IMPACTO AMBIENTAL	NOTA	PESO 3	
			Desorganização das atividades agrícolas e pesqueiras		0,07	
			Perda de áreas agrícolas, com conseqüente diminuição na produção de alimentos		0,07	
			Falta de matérias-primas em decorrência da inundação		0,06	
			Interrupção do ciclo natural de cheias, com conseqüente perda de produtividade agrícola		0,07	
			Perda de áreas produtivas		0,06	
			Geração de emprego		0,09	
			Prevenção de enchentes		0,08	
					1,00	
			IMPACTOS CULTURAIS			
			Impactos nas atividades recreativas dos reservatórios	0,47		0,33
			Perda de patrimônio cultural e recursos arqueológicos			0,34
			Perda de paisagens naturais com potencial turístico			0,33
			Σ	1,00		Σ
LEGISLATIVO	0,27	0,64	Licenciamento ambiental mais fácil, pela área de armazenamento dos reservatórios ser menor		0,09	
			Participação de organizações públicas voltadas para questões ambientais		0,09	
			Atendimento à legislação pertinente		0,09	
			Divulgação e apoio (financeiro ou logístico) de práticas ambientalmente corretas		0,10	
			Aumento do custo, pela necessidade de construir as comportas e casas de força abaixo do solo		0,09	
			Redução da intermitência das fontes renováveis e seus efeitos na rede elétrica		0,11	

**APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE IMPACTOS AMBIENTAIS COM SEUS
RESPECTIVOS PESOS APLICADO PARA O ESTUDO DE CASO**

MEIO	PESO 1	PESO 2	IMPACTO AMBIENTAL	NOTA	PESO 3
			Redução das perdas na transmissão, pelas UHRs poderem estar próximas aos centros de carga		0,10
			Redução das emissões provenientes das termelétricas		0,11
			Regulação da rede elétrica		0,11
			Fornecimento de eletricidade confiável		0,11
Σ	1			Σ	1,00

