



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**



Giulliana Randow Araújo

**O Licenciamento Ambiental de Usinas Hidrelétricas
Reversíveis: A Prática Internacional e a Potencial Regulação
no Brasil**

Ouro Preto

2026

Giulliana Randow Araújo

O Licenciamento Ambiental de Usinas Hidrelétricas
Reversíveis: A Prática Internacional e a Potencial Regulação
no Brasil

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: D.Sc. Alberto de Freitas Castro
Fonseca

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A663o Araujo, Giulliana Randow.

O licenciamento ambiental de usinas hidrelétricas reversíveis
[manuscrito]: a prática internacional e a potencial regulação no Brasil. /
Giulliana Randow Araujo. - 2026.
72 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Alberto de Freitas Castro Fonseca.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Usinas hidrelétricas. 2. Energia elétrica - Armazenamento. 3.
Direito ambiental internacional. 4. Licenças ambientais. 5.
Sustentabilidade e meio ambiente. I. Fonseca, Alberto de Freitas Castro.
II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 504:004

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322



FOLHA DE APROVAÇÃO

Giulliana Randow Araújo

Licenciamento Ambiental de Usinas Hidrelétricas Reversíveis: A Prática Internacional e a Potencial Regulação no Brasil

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental

Aprovada em 03 de março de 2026

Membros da banca

Prof. Dr. - Alberto Fonseca - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. MSc. - Pedro Nobuyuki Carvalho Urashima - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. - José Fernando Miranda - Universidade Federal de Ouro Preto

Alberto Fonseca, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Alberto de Freitas Castro Fonseca, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/03/2026, às 16:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1070245** e o código CRC **8BA21BD1**.

AGRADECIMENTOS

É com imensa alegria e gratidão que expresso meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram de maneira significativa para a conclusão deste trabalho de conclusão de curso. Este é um momento de celebração e realização, e não teria sido possível sem o apoio e o incentivo de cada um de vocês.

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Prof. D.Sc. Alberto de Freitas Castro Fonseca, pela orientação dedicada, pelo apoio constante, pelas valiosas contribuições acadêmicas e pela confiança depositada durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência, senso crítico e incentivo foram fundamentais para a construção desta pesquisa e para o meu crescimento profissional.

Aos meus pais, expresso minha mais profunda gratidão pelo amor incondicional, pelo incentivo contínuo aos estudos e por sempre acreditarem no meu potencial, mesmo nos momentos mais desafiadores. Sem o apoio e a base que me proporcionaram, esta conquista não seria possível.

Ao meu namorado, João Carlos, agradeço pelo companheirismo, pela paciência, pelo incentivo diário e por estar ao meu lado durante todas as etapas deste processo, oferecendo apoio emocional e motivação nos momentos de maior exigência.

A todos os professores, colegas e pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação e para a realização deste trabalho, deixo também o meu sincero agradecimento.

Subestimar a necessidade de preservar o meio ambiente é caminhar para a extinção.

(Milton Santos)

RESUMO

A crescente inserção de fontes renováveis intermitentes na matriz elétrica mundial tem ampliado a necessidade de soluções de armazenamento energético capazes de garantir flexibilidade operacional e segurança do sistema elétrico. Nesse contexto, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) destacam-se como tecnologia consolidada para armazenamento em larga escala, permitindo o deslocamento temporal da energia e contribuindo para a integração eficiente de fontes variáveis, como a solar e a eólica. No Brasil, entretanto, a ausência de regulamentação específica voltada ao licenciamento ambiental dessas usinas constitui um dos principais entraves à sua implementação, gerando insegurança jurídica e incertezas quanto aos procedimentos autorizativos. Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar práticas internacionais de regulamentação do licenciamento ambiental aplicáveis às UHRs e discutir diretrizes potenciais para o contexto brasileiro. A pesquisa caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura de natureza qualitativa e comparativa, conduzida conforme as diretrizes do protocolo PRISMA, com base na análise de artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais provenientes principalmente dos Estados Unidos, da União Europeia e da China. A metodologia envolveu a definição de pergunta norteadora segundo a estratégia PRISMA, busca estruturada em bases de dados acadêmicas, aplicação de critérios de elegibilidade e análise comparativa dos modelos regulatórios identificados. Os resultados indicam que, embora as UHRs sejam reconhecidas internacionalmente como infraestrutura estratégica para a transição energética e para o fornecimento de serviços ancilares ao sistema elétrico, persistem desafios regulatórios relacionados ao enquadramento dessas usinas em marcos normativos originalmente concebidos para hidrelétricas convencionais. Observa-se que modelos regulatórios mais eficazes apresentam diferenciação normativa conforme a tipologia dos projetos, integração entre planejamento energético e licenciamento ambiental e reconhecimento do valor sistêmico do armazenamento energético. A análise comparativa evidencia que a ausência desses elementos tende a ampliar a complexidade dos processos autorizativos e a reduzir a previsibilidade regulatória. Conclui-se que a adaptação do arcabouço regulatório brasileiro deve considerar as especificidades operacionais e ambientais das UHRs, buscando conciliar proteção ambiental, eficiência administrativa e segurança jurídica, de modo a viabilizar a inserção sustentável dessa tecnologia na matriz elétrica nacional e contribuir para os objetivos da transição energética.

Palavras-chave: Licenciamento ambiental, regulamentação internacional, sustentabilidade energética, usinas hidrelétricas reversíveis.

ABSTRACT

Environmental licensing of pumped storage hydropower plants: international practice and potential regulation in Brazil

The increasing integration of intermittent renewable energy sources into the global electricity matrix has intensified the need for energy storage solutions capable of ensuring operational flexibility and grid reliability. In this context, Pumped Storage Hydropower (PSH) plants stand out as a consolidated large-scale storage technology, enabling temporal energy shifting and supporting the efficient integration of variable renewable sources such as solar and wind power. In Brazil, however, the lack of specific environmental licensing regulations for PSH projects represents one of the main barriers to their implementation, generating legal uncertainty and ambiguity regarding authorization procedures. In light of this scenario, this study aims to analyze international environmental licensing regulatory practices applicable to PSH and to discuss potential guidelines for the Brazilian context. The research is characterized as a qualitative and comparative systematic literature review conducted according to the PRISMA protocol, based on the analysis of scientific articles, technical reports, and institutional documents primarily from the United States, the European Union, and China. The methodological approach included the definition of a guiding research question using the PRISMA strategy, structured database searches, application of eligibility criteria, and comparative analysis of identified regulatory frameworks. The results indicate that although PSH is internationally recognized as strategic infrastructure for energy transition and the provision of ancillary services to power systems, regulatory challenges persist due to the classification of PSH projects under legal frameworks originally designed for conventional hydropower plants. More effective regulatory models tend to incorporate differentiated frameworks according to project typology, integration between energy planning and environmental licensing, and recognition of the systemic value of energy storage. The comparative analysis suggests that the absence of these elements increases procedural complexity and reduces regulatory predictability. It is concluded that adapting the Brazilian regulatory framework should consider the operational and environmental specificities of PSH projects, balancing environmental protection, administrative efficiency, and legal certainty to enable the sustainable integration of this technology into the national energy matrix and support energy transition goals.

Keywords: Energy sustainability, environmental licensing, international regulation, pumped storage hydropower plants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma usina hidrelétrica reversível 5

Figura 2 – Fluxograma Método PRISMA 20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos modelos de regulação e licenciamento de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) em diferentes jurisdições internacionais	35
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIA – Avaliação de Impacto Ambiental

ALP – *Alternative Licensing Process*

Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DOE – *Department of Energy* (Departamento de Energia dos EUA)

EA – *Environmental Assessment* (Avaliação Ambiental)

EIA- *Environmental Impact Assessment* (Avaliação de Impacto Ambiental/ Estudo de Impacto Ambiental)

EIS - *Environmental Impact Statement* (Declaração de Impacto Ambiental)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FERC – *Federal Energy Regulatory Commission* (Comissão Federal Reguladora de Energia)

FPA – *Federal Power Act*

GEE – Gases de Efeito Estufa

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ILP – *Integrated Licensing Process*

LAC – Licença Ambiental por Adesão e Compromisso

LAE – Licença Ambiental Especial

LAU – Licença Ambiental Única

LI – Licença de Instalação

LO – Licença de Operação

LP – Licença Prévia

NEA – *National Energy Administration* (Administração Nacional de Energia da China)

NEPA – *National Environmental Policy Act*

PICO – *Population, Intervention, Comparison, Outcome* (Estratégia de busca)

PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses*

PSH – *Pumped Storage Hydropower*

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

RSL – Revisão Sistemática da Literatura

SIN – Sistema Interligado Nacional

Sisnama – Sistema Nacional do Meio Ambiente

TLP – *Traditional Licensing Process*

UE – União Europeia

UHE – Usina Hidrelétrica

UHR-S – Usina Hidrelétrica Reversível Sazonal

UHRs – Usinas Hidrelétricas Reversíveis

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVO GERAL	3
2.1 Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1 Usinas Hidrelétricas Reversíveis	4
3.1.1 Características Principais das Usinas Hidrelétricas Reversíveis.....	4
3.1.2 Benefícios da Tecnologia para Armazenamento de Energia.....	5
3.1.3 Exemplos de Aplicação no Sistema Elétrico	6
3.2 Importância no Contexto Energético.....	7
3.3 Licenciamento Ambiental.....	8
3.3.1 Princípios Gerais do Licenciamento	8
3.3.2 Objetivos e Importância do Licenciamento	9
3.3.3 Etapas e Modalidades de Licença.....	10
3.3.4 Principais Órgãos Reguladores.....	11
4. MÉTODOS.....	13
4.1 Estratégia de Busca e Fontes de Dados.....	13
4.2 Procedimento de Seleção e Análise dos Estudos.....	14
4.3 Critérios de Elegibilidade	15
4.4 Critérios de Análise Comparativa.....	16
4.5 Análise dos Dados	17
5. RESULTADOS	19
5.1 Fluxograma PRISMA	19

5.2	Histórico das Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Mundo.....	20
5.3	Modelos de Regulação em Outros Países	22
5.3.1	<i>Estados Unidos: Limitações do Modelo Regulatório e Entraves no Licenciamento</i>	<i>24</i>
5.3.2	<i>União Europeia: Rigor Ambiental e Integração com o Planejamento Energético.....</i>	<i>28</i>
5.3.3	<i>China: Planejamento Centralizado e Licenciamento Subordinado à Política Energética.....</i>	<i>31</i>
5.3.4	<i>Síntese Comparativa e Lacunas no Licenciamento Ambiental</i>	<i>33</i>
5.4	Diretrizes Preliminares e Genéricas Propostas para a Regulamentação Brasileira das Usinas Hidrelétricas Reversíveis.....	39
5.4.1	<i>Subsídios para uma Eventual Diretriz Geral: Licenciamento Ambiental Proporcional ao Impacto</i>	<i>40</i>
5.4.2	<i>Requisitos Específicos para a Avaliação de Impactos Ambientais.....</i>	<i>42</i>
5.4.3	<i>Medidas Mitigadoras e Compensatórias.....</i>	<i>44</i>
5.4.4	<i>Integração entre Licenciamento Ambiental e Planejamento Energético .</i>	<i>45</i>
5.4.5	<i>Síntese das Diretrizes Propostas.....</i>	<i>47</i>
6.	CONCLUSÃO.....	49
7.	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A transição energética global tem impulsionado uma inserção massiva de fontes renováveis variáveis, como a eólica e a solar fotovoltaica, na matriz elétrica. Embora essenciais para a descarbonização, essas fontes introduzem uma intermitência na geração que nem sempre coincide com a curva de demanda, gerando instabilidade e a necessidade de soluções de contingência por parte do operador do sistema (HUNT; FREITAS, 2016; GUIMARÃES, 2024). Nesse cenário, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) consolidam-se como uma tecnologia madura e eficaz para o armazenamento de energia em larga escala, permitindo estocar excedentes energéticos e mitigar o desperdício (*curtailment*) (GUIMARÃES, 2024). Estudos recentes indicam que o Brasil possui um vasto potencial para essa tecnologia, com milhares de sítios viáveis que poderiam auxiliar decisivamente na segurança energética nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2025).

Historicamente, o sistema elétrico brasileiro baseia-se em hidrelétricas convencionais com grandes reservatórios, que funcionam como baterias virtuais. No entanto, a expansão recente tem sido dominada por usinas a fio d'água e fontes intermitentes, aumentando a vulnerabilidade do sistema a eventos climáticos extremos e secas (HUNT; FREITAS, 2016). A implementação de UHRs, especialmente as de ciclo sazonal, surge como uma alternativa para armazenar energia de períodos úmidos para uso em períodos secos, garantindo a estabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN) (HUNT; FREITAS, 2016). Apesar desse potencial estratégico e da existência de plantas antigas como a Elevatória de Traição e Pedreira, que operam com finalidades distintas da arbitragem moderna de energia, o Brasil ainda carece de capacidade instalada de UHRs operando comercialmente para o setor elétrico (UHLMANN et al., 2018; EPE, 2025).

Um dos principais entraves para o desenvolvimento dessa tecnologia no país não é apenas técnico, mas regulatório. É fundamental distinguir que, embora existam discussões avançadas sobre a regulação operacional e a remuneração de serviços ancilares no setor elétrico, observa-se uma lacuna crítica no que tange ao licenciamento ambiental específico (BAJAY et al., 2020; EPE, 2025). A ausência de um rito de licenciamento que contemple as particularidades das

UHRs, como a possibilidade de circuito fechado ou o uso de áreas já degradadas, gera insegurança jurídica e imprevisibilidade nos prazos de aprovação, dificultando a atração de investimentos privados necessários para obras de longo prazo (BAJAY et al., 2020).

A experiência internacional oferece subsídios importantes para superar esses desafios. Nos Estados Unidos, a regulamentação conduzida pela *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC) integra a análise ambiental ao processo de licenciamento, permitindo maior celeridade e segurança (BAJAY et al., 2020). Na Europa, países como Portugal adaptaram suas normativas para viabilizar a expansão de UHRs como suporte à penetração eólica, focando na mitigação de impactos específicos como a variação de nível dos reservatórios (BAJAY et al., 2020). Projetos inovadores, como o de Kidston na Austrália, demonstram ainda como a regulação pode fomentar o reaproveitamento de infraestruturas de mineração desativadas, reduzindo impactos ambientais (ANDRITZ HYDRO, 2022).

Diante desse cenário, verifica-se que o principal desafio para a implementação das UHRs no Brasil não reside exclusivamente na viabilidade técnica da tecnologia, mas na ausência de um modelo de licenciamento ambiental que reconheça suas especificidades operacionais e seus impactos diferenciados. A inexistência de parâmetros claros quanto ao enquadramento ambiental, à tipologia dos empreendimentos e à proporcionalidade das exigências técnicas gera insegurança jurídica e amplia a imprevisibilidade dos prazos de aprovação, fatores que desestimulam investimentos em projetos de elevado porte e longo horizonte de maturação. Considerando o papel estratégico das UHRs na ampliação da flexibilidade do Sistema Interligado Nacional, torna-se imprescindível refletir sobre a adequação do arcabouço regulatório vigente à realidade dessa tecnologia.

Nesse contexto, este trabalho justifica-se pela necessidade de contribuir tecnicamente para o debate regulatório nacional, a partir de uma análise comparativa fundamentada em experiências internacionais consolidadas. Ao examinar os modelos adotados nos Estados Unidos, na União Europeia e na China, busca-se identificar elementos estruturantes capazes de orientar a formulação de diretrizes para o licenciamento ambiental das UHRs no Brasil. Assim, pretende-se oferecer subsídios que conciliem a proteção ambiental com a racionalidade regulatória e com as demandas da transição energética, fortalecendo a construção de um marco institucional capaz de viabilizar a inserção segura e sustentável dessa tecnologia na matriz elétrica brasileira.

2 OBJETIVO GERAL

Analisar práticas de regulamentação do licenciamento ambiental de Usinas Hidrelétricas Reversíveis em outros países e discutir suas potenciais aplicações para o contexto brasileiro.

2.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar o histórico da implantação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil e no mundo.
- Identificar os principais impactos ambientais associados às Usinas Hidrelétricas Reversíveis.
- Analisar os modelos de regulação do licenciamento ambiental das Usinas Hidrelétricas Reversíveis em diferentes países, destacando normas, leis, requisitos e desafios enfrentados.
- Propor recomendações para a regulamentação do licenciamento de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil, com base na análise comparativa das jurisdições internacionais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Usinas Hidrelétricas Reversíveis

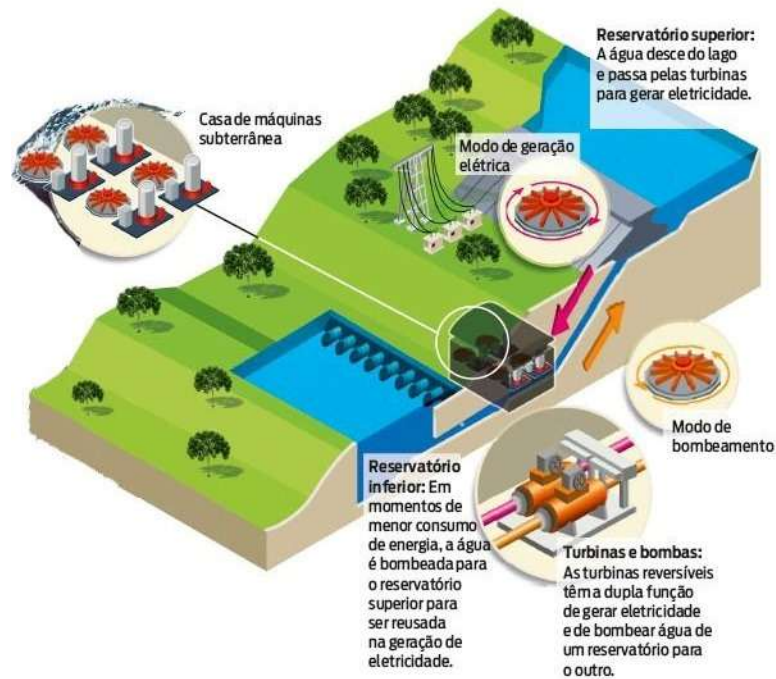
3.1.1 Características Principais das Usinas Hidrelétricas Reversíveis

As Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) são compostas por dois reservatórios de água situados em diferentes níveis, dos quais estão interligados por uma casa de bomba e por geradores-motores, sendo frequentemente implantadas aproveitando-se as condições topográficas favoráveis da região.

A água armazenada no reservatório inferior será bombeada para o reservatório de cima, nos momentos de menor demanda de energia ao longo do dia. Onde será estocada na forma de energia potencial gravitacional. Em seguida, nos momentos de pico, as turbinas irão mandar a água do reservatório de cima para o reservatório de baixo gerando energia, tal qual uma Usina Hidrelétrica convencional.

Segundo Schreiber (1978, apud Canales, 2015), a construção dos reservatórios das UHRs pode ocorrer de duas maneiras. A primeira, chamada muitas vezes de circuito fechado, utiliza reservatórios independentes de cursos d'água, exigindo vazões mínimas apenas com o intuito de compensar perdas naturais por evaporação e infiltração. A segunda maneira consiste em construir os reservatórios no próprio leito do rio, operando de forma convencional de dia e utilizando a energia renovável excedente para bombear a água durante a noite. Em ambos os casos, a topografia da região deve garantir o enchimento adequado no tempo previsto pelo projeto.

Figura 1 - Esquema de uma usina hidrelétrica reversível.



Fonte: Pereira (2020).

3.1.2 Benefícios da Tecnologia para Armazenamento de Energia

A principal vantagem das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) reside na sua capacidade de armazenar enormes quantidades de energia em grande escala, superando outras tecnologias de armazenamento (HUNT; FREITAS, 2016). Essa capacidade de armazenamento funciona como um deslocamento temporal da energia, o que gera benefícios sistêmicos diretos.

Segundo Hunt e Freitas (2016), o armazenamento permite a redução do custo de operação do sistema elétrico. Isso ocorre pois a energia armazenada (em momentos de baixo custo, como de sobra de geração eólica ou solar) pode ser utilizada posteriormente para substituir a geração de usinas termelétricas, que possuem custo muito mais elevado (HUNT; FREITAS, 2016).

Especificamente no modelo de UHRs Sazonais (UHR-S), o armazenamento de água do período chuvoso para utilização no período seco confere um aumento significativo da segurança energética do sistema brasileiro, mitigando os impactos de secas severas (HUNT; FREITAS,

2016). Adicionalmente, essa gestão do armazenamento hídrico permite a redução do vertimento (desperdício de água/energia) nas usinas hidrelétricas convencionais e pode até postergar a necessidade de investimentos em novas linhas de transmissão (HUNT; FREITAS, 2016).

3.1.3 Exemplos de Aplicação no Sistema Elétrico

As Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) são a tecnologia de armazenamento de energia em larga escala mais madura, confiável e disseminada globalmente (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2020; UHLMANN et al., 2018). Elas representam mais de 90% de toda a capacidade de armazenamento de energia conectada à rede elétrica mundial (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2020; DE CARVALHO et al., 2020). Diversos países utilizam UHRs como ferramenta estratégica para garantir a estabilidade do sistema e integrar fontes renováveis intermitentes. A China lidera a expansão global, enquanto países europeus como Espanha e Portugal as utilizam para otimizar suas extensas gerações eólica e solar. Nos Estados Unidos, a *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC) possui um processo de licenciamento consolidado para esses empreendimentos (BAJAY et al., 2020).

Um exemplo internacional notável de aplicação inovadora é o Projeto Hidrelétrico Reversível de Kidston (Genex Kidston), localizado em Queensland, Austrália (ANDRITZ HYDRO, 2022). Este projeto exemplifica a tendência de reaproveitamento de infraestruturas existentes, sendo desenvolvido em uma mina de ouro desativada. O empreendimento utiliza duas cavas de mineração exauridas, localizadas a diferentes altitudes, como os reservatórios superior e inferior (ANDRITZ HYDRO, 2022). O projeto, comissionado à empresa Andritz, foi projetado para fornecer 250 MW de capacidade de resposta rápida e 2.000 MWh de armazenamento, sendo considerado essencial para estabilizar a rede local e apoiar a integração da geração solar na região (ANDRITZ HYDRO, 2022).

No Brasil, apesar do vasto potencial identificado em estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a tecnologia é subutilizada (UHLMANN et al., 2018). Historicamente, o país possui duas plantas reversíveis de pequeno porte, a UHE da Traição (atual Elevatória de Traição) e a UHE Pedreira, ambas em São Paulo e construídas nas décadas de 1930 e 1940 (UHLMANN et al., 2018). Contudo, essas instalações operam atualmente como estações de bombeamento para controle de cheias e abastecimento de água, não prestando serviços

energéticos ou ancilares relevantes ao Sistema Interligado Nacional (SIN) (UHLMANN et al., 2018).

A aplicação futura das UHRs no SIN tem sido objeto de diversos estudos técnicos e acadêmicos, focando em configurações inovadoras. Moreira (2023) avaliou a viabilidade da conversão da UHE Henry Borden, uma usina convencional histórica, em um sistema reversível hibridizado com energia fotovoltaica flutuante em seus reservatórios (MOREIRA, 2023). De forma análoga ao projeto australiano de Kidston, Guimarães (2024) propôs a implantação de sistemas hidro reversíveis/fotovoltaicos em cavas exauridas de mineração no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, destacando o potencial de reaproveitamento de áreas degradadas (GUIMARÃES, 2024). Essa hibridização com usinas solares flutuantes é vista como uma forma de otimizar o uso do solo e da infraestrutura elétrica já existente nos reservatórios (SANTOS; MESQUITA; TOSTES, 2022).

3.2 Importância no Contexto Energético

As Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) são apontadas como uma tecnologia-chave para a modernização e sustentabilidade do setor elétrico, especialmente em cenários de transição energética (BRANDÃO; CASTRO; HUNT, 2021). A sua importância estratégica se baseia na capacidade de fornecer armazenamento de energia em larga escala, o que viabiliza a expansão de outras fontes limpas e garante a estabilidade do sistema (BRANDÃO et al., 2021; MOREIRA, 2023).

A principal contribuição das UHRs é a sua capacidade de gerar energia de forma controlada e previsível, ao contrário das fontes eólica e solar fotovoltaica, que dependem de fatores climáticos e são intermitentes. Essas fontes geram eletricidade apenas quando há disponibilidade do recurso (vento ou sol), o que nem sempre coincide com os horários de maior demanda (RÊGO; FARIAS; RIBEIRO, s.d.). As UHRs atuam absorvendo o excedente de energia produzida nos momentos de baixa demanda, bombeando a água para o reservatório superior, e dissipando essa energia armazenada nos momentos de maior demanda, em que se utilizam turbinas no lugar das bombas ou transformam a bomba utilizada anteriormente em

turbinas para levar a água para o reservatório de baixo. Essa flexibilidade permite o máximo aproveitamento da geração renovável, evitando o desperdício de energia, conhecido como *curtailment* (RÊGO; FARIAS; RIBEIRO, s.d.). Estudos recentes têm demonstrado a possibilidade da hibridização de UHRs com parques eólicos e placas fotovoltaicas flutuantes, o que otimizará ainda mais a produção de energia.

As Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) contribuem indiretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao viabilizarem a integração de fontes renováveis intermitentes à matriz energética, como a solar e a eólica. Trata-se de uma tecnologia de armazenamento e geração com baixa emissão de carbono, que, associada ao aumento da eficiência operacional do sistema elétrico, favorece a diminuição significativa das emissões. Além disso, as UHRs apresentam elevada capacidade de armazenamento e rápida resposta operacional, o que reduz a necessidade de acionamento de usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis. Dessa forma, contribuem para a redução das emissões de CO₂ e desempenham papel estratégico na descarbonização do setor energético.

As UHRs são consideradas uma alternativa de grande importância para a expansão e segurança do Sistema Interligado Nacional (SIN) devido a alta flexibilidade e confiabilidade desse modelo de usina, na qual se tem capacidade de atender rapidamente os picos de demanda e os momentos de falha de geração. Além da arbitragem de energia, as UHRs podem fornecer uma gama de serviços ancilares essenciais para a estabilidade da rede, como controle de frequência, regulação de tensão e reserva operativa (reserva de potência de rápida resposta) (BRANDÃO; CASTRO; HUNT, 2021; INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2020). No contexto brasileiro, UHRs sazonais também podem aumentar a segurança energética ao otimizar o uso dos recursos hídricos, armazenando energia em períodos úmidos para utilização em períodos secos (HUNT; FREITAS, 2016).

3.3 Licenciamento Ambiental

3.3.1 Princípios Gerais do Licenciamento

O licenciamento ambiental é definido pela doutrina como uma ação típica e indelegável do Poder Executivo na gestão do meio ambiente, funcionando como um mecanismo de controle

da Administração Pública sobre atividades humanas com potencial de impacto ambiental. Sob a ótica técnica, o procedimento permite verificar se a implementação ou operação de atividades poluidoras está em conformidade com a legislação e com as exigências técnicas pertinentes (FARIAS, 2024).

Legalmente, o conceito evoluiu da Resolução nº 237/97 do Conama, que o descrevia como um procedimento administrativo para licenciar a localização, instalação, ampliação e operação de empreendimentos utilizadores de recursos ambientais (FARIAS, 2024), até a Lei Geral do Licenciamento Ambiental (Lei nº 15.190/2025). Esta lei define o licenciamento ambiental como o processo administrativo destinado a licenciar atividades ou empreendimentos efetiva ou potencialmente poluidores ou capazes de causar degradação do meio ambiente.

É fundamental distinguir o licenciamento da licença ambiental. Enquanto o primeiro é o processo de verificação das condições, a licença é o ato administrativo propriamente dito, que estabelece as condições, restrições e medidas de controle a serem obedecidas pelo empreendedor. Não existe licença sem o prévio processo de licenciamento, embora o licenciamento possa ocorrer sem que a licença seja necessariamente concedida ao final, caso as condições não sejam atendidas (FARIAS, 2024).

3.3.2 Objetivos e Importância do Licenciamento

A função primordial do licenciamento ambiental conforme Farias et al. (2024), é permitir que atividades potencialmente degradadoras sejam previamente analisadas e compatibilizadas com a proteção do ecossistema. Entre seus objetivos específicos, destacam-se:

- **Controle e Mitigação:** Impor medidas mitigadoras para a degradação autorizada e delimitar o limite de tolerância dos impactos ambientais.
- **Segurança Técnica:** Garantir que decisões sobre grandes empreendimentos baseiem-se em critérios técnicos, protegendo a coletividade de decisões estritamente políticas.
- **Equilíbrio Ambiental:** Defender o meio ambiente ecologicamente equilibrado e a qualidade de vida da coletividade.

A importância desse mecanismo reside no fato de ser o principal instrumento estatal para viabilizar a utilização racional dos recursos ambientais. Além disso, para o mercado, a conformidade obtida pelo licenciamento é vista como um indicador de responsabilidade socioambiental da empresa (FARIAS, 2024).

3.3.3 *Etapas e Modalidades de Licença*

O licenciamento ambiental ordinário estrutura-se, via de regra, em três etapas sequenciais e interdependentes, sendo que a conclusão exitosa de cada fase enseja a expedição de uma licença específica. Nesse contexto, a Lei nº 15.190/2025, ao disciplinar a modalidade trifásica, estabelece as seguintes definições para cada um desses atos administrativos:

- **Licença Prévia (LP):** Licença que atesta, na fase de planejamento, a viabilidade ambiental de atividade ou de empreendimento quanto à sua concepção e localização, e estabelece requisitos e condicionantes ambientais;

- **Licença de Instalação (LI):** Licença que permite a instalação de atividade ou de empreendimento, aprova os planos, os programas e os projetos de prevenção, de mitigação ou de compensação dos impactos ambientais negativos e estabelece condicionantes ambientais;

- **Licença de Operação (LO):** Licença que permite a operação de atividade ou de empreendimento, aprova as ações de controle e monitoramento ambiental e estabelece condicionantes ambientais para a operação e, quando necessário, para a sua desativação (BRASIL, 2025).

A Lei nº 15.190/2025 introduziu ou consolidou novas modalidades para conferir celeridade ao processo:

- **Licença Ambiental por Adesão e Compromisso (LAC):** Concedida automaticamente mediante declaração de adesão do empreendedor a requisitos preestabelecidos;
- **Licença Ambiental Única (LAU):** Atesta a viabilidade e autoriza a instalação e operação em uma única etapa;
- **Licença Ambiental Especial (LAE):** Destinada a empreendimentos estratégicos, estabelecendo condicionantes específicas para sua implementação (BRASIL, 2025).

A decisão final do órgão ambiental é discricionária, ou seja, com base na análise técnica dos estudos e nas contribuições sociais, o órgão pode aprovar ou rejeitar o projeto mediante o

cumprimento de condicionantes, realizando um juízo político sobre a aceitabilidade dos impactos previstos (SÁNCHEZ, 2013).

3.3.4 Principais Órgãos Reguladores

A estrutura de governança do licenciamento ambiental no Brasil está inserida no Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama), que articula órgãos e entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios. A atuação desses órgãos é pautada pela cooperação entre os entes federados e pela distribuição de competências estabelecida na Lei Complementar nº 140/2011.

Os principais atores nesse processo podem ser classificados conforme suas atribuições:

- **Conselho de Governo:** Atua como órgão superior, com a função de assessorar o Presidente da República na formulação da política nacional e propor diretrizes governamentais para o meio ambiente, inclusive indicando obras e atividades para a lista de empreendimentos estratégicos sujeitos a licenciamento.
- **Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama):** Exerce papel fundamental como órgão consultivo e deliberativo, responsável pela expedição de resoluções que definem diretrizes e normas técnicas para o licenciamento, como a definição de atividades poluidoras e os estudos ambientais necessários (FARIAS, 2024).
- **Autoridades Licenciadoras (Órgãos Executores):** São os órgãos ou entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios integrantes do Sisnama que detêm o poder decisório. Eles respondem pela emissão, renovação, acompanhamento e fiscalização das licenças ambientais.
- **Nível Federal:** O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) é o órgão executor responsável pelo licenciamento de grandes empreendimentos de impacto nacional ou regional (FARIAS, 2024).
- **Nível Estadual e Municipal:** Os órgãos estaduais e municipais de meio ambiente assumem a competência pelo licenciamento de atividades cujo impacto seja,

respectivamente, regional ou local, observadas as tipologias e critérios de descentralização.

4 MÉTODOS

A presente pesquisa caracteriza-se como uma Revisão Sistemática da Literatura de natureza qualitativa e comparativa. Diferentemente de revisões quantitativas com aplicação de meta-análise, o objetivo deste estudo não consistiu na mensuração estatística de resultados empíricos, mas na identificação, sistematização e análise crítica de modelos regulatórios aplicáveis às Usinas Hidrelétricas Reversíveis em diferentes contextos institucionais.

Considerando a heterogeneidade dos documentos incluídos, que abrangem artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais, adotou-se abordagem qualitativa interpretativa, voltada à comparação estruturada de marcos normativos e práticas regulatórias.

Com o intuito de atingir os objetivos propostos neste trabalho, adotou-se como método a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), conduzida de acordo com as diretrizes do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses*) (PAGE et al., 2021). Este método foi escolhido para garantir a transparência, a replicabilidade e a minimização de viés na seleção dos documentos analisados.

A estruturação da pesquisa seguiu a definição da pergunta norteadora baseada na estratégia PICO (*Population, Intervention, Comparison, Outcome*) buscando responder: “Quais são os modelos regulatórios e práticas de licenciamento ambiental para UHRs adotados internacionalmente e quais seus impactos ambientais comparados ao Brasil?”.

4.1 Estratégia de Busca e Fontes de Dados

As buscas foram realizadas entre outubro e dezembro de 2025 nas bases de dados eletrônicas Scopus e Google Acadêmico. O Google Acadêmico foi utilizado como base complementar por permitir a recuperação de documentos técnicos, relatórios institucionais e literatura cinzenta, relevantes para análises regulatórias, que nem sempre estão indexados em bases estruturadas como Scopus. Para a recuperação dos estudos, foram utilizados descritores em inglês, combinados por meio de operadores booleanos “OR” e “AND”.

A string de busca principal utilizada compreendeu a combinação dos termos: "*Pumped Storage Hydropower*" OR "*Pumped Hydro*" AND "*Environmental Licensing*" OR "*Regulation*" OR "*Environmental Impact*" OR "*Impact Assessment*" OR "*Permitting*" OR "*Approval*", para o Google Acadêmico; e a combinação dos termos: "*Pumped Storage Hydropower*" OR "*Pumped Hydro*" AND "*Environmental Licensing*" OR "*Regulation*" OR "*Environmental Impact*" OR "*Impact Assessment*" OR "*Permitting*" OR "*Approval*", para o Scopus.

4.2 Procedimento de Seleção e Análise dos Estudos

O processo de seleção dos estudos identificados nas bases de dados foi conduzido em duas etapas sucessivas, com o objetivo de garantir rigor metodológico, rastreabilidade e transparência na construção do corpus documental analisado.

Na primeira etapa, procedeu-se à leitura dos títulos e dos resumos dos documentos recuperados a partir das estratégias de busca previamente definidas. Essa fase de triagem inicial teve como finalidade verificar a aderência temática dos estudos à pergunta de pesquisa e aos critérios de elegibilidade estabelecidos. Foram excluídos, nesse momento, os trabalhos que não abordavam Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) sob a perspectiva regulatória ou ambiental, bem como aqueles cujo foco se restringia exclusivamente a aspectos técnicos de engenharia sem interface com o licenciamento ambiental.

Na segunda etapa, os textos selecionados na triagem preliminar foram lidos na íntegra. Nessa fase, aplicaram-se os critérios de elegibilidade previamente definidos, com especial atenção à presença de conteúdo relacionado a modelos regulatórios, instrumentos de licenciamento ambiental, avaliação de impactos ambientais e experiências institucionais nos países de interesse comparativo. A leitura integral permitiu confirmar a pertinência temática dos estudos e identificar, com maior profundidade, as contribuições efetivas de cada documento para os objetivos da pesquisa.

A seleção foi conduzida exclusivamente pela autora, com registro sistemático das razões de exclusão em cada etapa, de modo a assegurar rastreabilidade metodológica e permitir a reprodutibilidade do processo de revisão. Esse procedimento buscou reduzir vieses e conferir maior confiabilidade dos resultados obtidos.

Paralelamente, foi elaborada uma planilha em formato Excel contendo os seguintes campos: título do documento, autoria, ano de publicação, país de estudo e síntese do conteúdo. Essa planilha constituiu instrumento auxiliar de organização e análise, permitindo a visualização comparativa das abordagens, a identificação de convergências temáticas e o acompanhamento do processo de depuração do material.

A partir dessa sistematização, os documentos duplicados foram identificados e excluídos. Em seguida, realizou-se nova análise dos registros remanescentes, com o objetivo de manter apenas aqueles que efetivamente continham conteúdo relevante acerca do licenciamento ambiental de Usinas Hidrelétricas Reversíveis nos contextos internacionais selecionados. Esse refinamento final resultou no conjunto de estudos utilizados para a análise comparativa apresentada no capítulo de resultados.

4.3 Critérios de Elegibilidade

Para a seleção dos materiais, foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão:

- **Critérios de Inclusão:** Foram selecionados artigos científicos, relatórios técnicos e documentos legais que tratassem especificamente de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs), materiais que abordassem a regulamentação e o licenciamento ambiental. Priorizaram-se publicações referentes a países considerados estratégicos para a análise comparativa, tais como China, Estados Unidos e países membros da União Europeia, em razão de sua relevância no desenvolvimento e na regulação dessa tecnologia. O recorte temporal adotado compreendeu publicações entre os anos de 2010 e 2025, de modo a assegurar a atualidade das informações técnicas e das discussões regulatórias analisadas. Excepcionalmente, foi incluído um estudo anterior ao período delimitado (publicação de 2004), em virtude de sua relevância técnica e normativa para a compreensão do arcabouço regulatório de referência e dos fundamentos institucionais que permanecem aplicáveis às análises contemporâneas, sendo sua manutenção justificada pela contribuição substancial ao entendimento do tema investigado.

- **Critérios de Exclusão:** Foram descartados estudos focados exclusivamente em aspectos técnicos de engenharia civil, elétrica ou mecânica sem viés ambiental ou regulatório, estudos sobre UHRs em países fora do escopo da análise, documentos duplicados e aqueles cujo texto completo não estava disponível para acesso.

4.4 Critérios de Análise Comparativa

A análise comparativa apresentada neste capítulo foi estruturada a partir dos elementos recorrentes identificados no conjunto final de estudos incluídos na revisão sistemática. A leitura integral dos documentos selecionados evidenciou quatro dimensões analíticas centrais para a compreensão dos modelos regulatórios aplicáveis às Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs):

- a) Estrutura institucional do licenciamento ambiental, considerando o grau de centralização, a repartição federativa de competências e a articulação entre órgãos ambientais energéticos;
- b) Diferenciação regulatória por tipologia de UHR, especialmente quanto ao tratamento conferido a projetos open-loop e closed-loop;
- c) Modelo de remuneração e reconhecimento dos serviços prestados pelas UHRs, incluindo participação em mercados de energia, capacidade e serviços ancilares;
- d) Nível de integração entre planejamento energético e licenciamento ambiental.

Essas dimensões emergiram da análise dos estudos que compõem o corpus final da revisão e permitiram organizar a comparação entre as jurisdições que apresentaram maior densidade documental e evidências consistentes acerca da regulamentação de UHRs.

Assim, a comparação concentra-se nos Estados Unidos, em países membros da União Europeia e na China, não por seleção prévia arbitrária, mas por terem sido jurisdições mais recorrentes e detalhadamente abordadas nos estudos incluídos após a aplicação dos critérios de elegibilidade. Essas experiências apresentaram volume significativo de produção técnica e acadêmica, bem como diversidade de arranjos regulatórios, possibilitando análise comparativa consistente quanto ao enquadramento ambiental, aos mecanismos de remuneração e à integração institucional.

4.5 Análise dos Dados

A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa e comparativa, com base na construção de uma matriz analítica (checklist) destinada a sistematizar a comparação entre os modelos regulatórios identificados na revisão sistemática.

Com o intuito de garantir maior rigor metodológico, foram definidos previamente critérios de análise aplicáveis a cada região ou jurisdição investigada (e.g., Estados Unidos, União Europeia e China). Esses critérios foram extraídos da literatura especializada e organizados em categorias temáticas, permitindo a comparação estruturada dos modelos de licenciamento ambiental.

A matriz de verificação considerou os seguintes eixos analíticos:

1. Base legal aplicável às UHRs
 - Existência de legislação específica ou enquadramento como hidrelétrica convencional;
 - Integração com normas ambientais gerais.
2. Diferenciação por tipologia (e.g., *open-loop* x *closed-loop*)
 - Existência de procedimentos diferenciados conforme conectividade hídrica;
 - Tratamento específico para projetos em áreas antropizadas.
3. Tempo e previsibilidade do licenciamento
 - Duração média dos processos;
 - Existência de procedimentos acelerados ou simplificados.
4. Integração com o planejamento energético
 - Articulação entre política ambiental e planejamento do setor elétrico;
 - Reconhecimento do valor sistêmico das UHRs.
5. Participação social e transparência
 - Existência de consultas públicas formais;
 - Possibilidade de judicialização ou contestação.
6. Principais lacunas identificadas
 - Entraves regulatórios recorrentes;

- Dificuldades relacionadas a impactos ambientais ou institucionais.

A partir da aplicação desses critérios, foi possível sistematizar as convergências e divergências entre os modelos internacionais, bem como identificar padrões regulatórios e boas práticas. Com base nessa análise estruturada, foram posteriormente elaboradas diretrizes para a potencial regulamentação no Brasil, fundamentadas nas evidências comparativas obtidas.

Os eixos analíticos da matriz comparativa foram definidos a priori, com base em categorias recorrentes identificadas na literatura internacional sobre regulação de UHRs, tais como diferenciação tipológica, integração com planejamento energético, previsibilidade normativa e participação pública.

A definição prévia desses critérios buscou evitar viés confirmatório e assegurar coerência metodológica entre a etapa de revisão e a construção das diretrizes propostas para o contexto brasileiro.

5 RESULTADOS

5.1 Fluxograma PRISMA

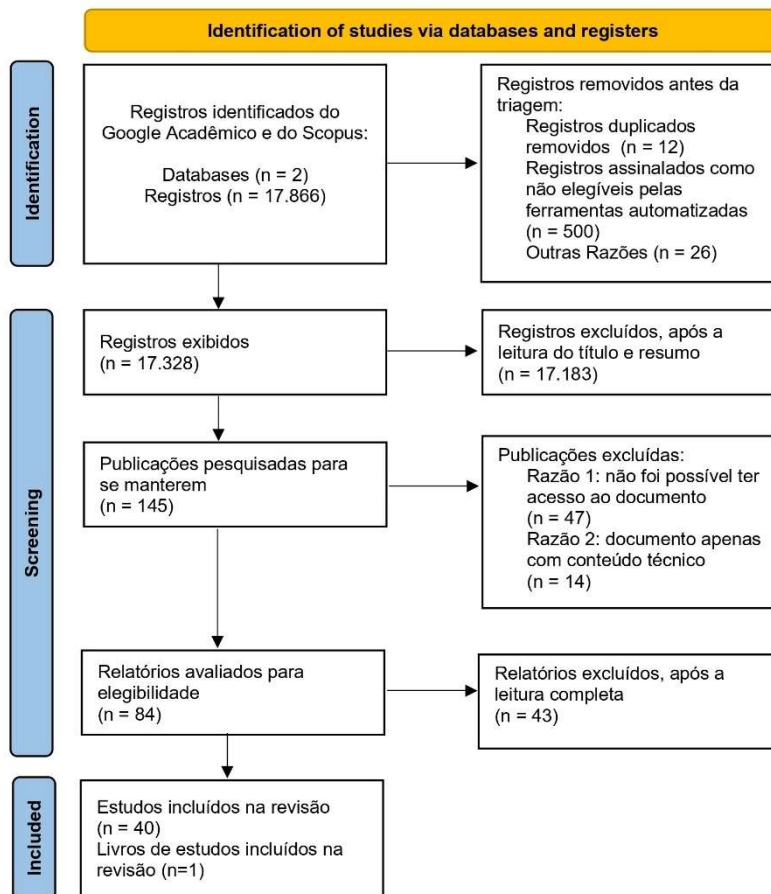
O processo de seleção seguiu o fluxo preconizado pelo PRISMA, dividido em quatro fases: identificação, triagem (screening), elegibilidade e inclusão. Inicialmente, foram identificados 17.866 registros nas bases de dados consultadas (17.500 via Google Acadêmico e 366 via Scopus). Após a aplicação de filtros automáticos (ano e país), procedeu-se à leitura de títulos e resumos (17.000 via Google Acadêmico e 340 via Scopus).

Na fase de elegibilidade, os textos completos remanescentes foram lidos na íntegra (107 via Google Acadêmico e 38 via Scopus). Nesta etapa, documentos foram excluídos principalmente por não apresentarem dados regulatórios específicos ou por tratarem apenas de eficiência energética, sem abordar o licenciamento ambiental. Ao final do processo, foram incluídos na revisão 41 documentos, dos quais 30 provenientes de base aberta e 11 da base do Scopus.

Do total de registros inicialmente identificados, foram excluídos documentos duplicados, estudos com enfoque exclusivamente técnico de engenharia, publicações sem acesso ao texto completo e materiais que não abordavam aspectos regulatórios ou de licenciamento ambiental. O detalhamento quantitativo das exclusões encontra-se sistematizado no fluxograma PRISMA apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma Método PRISMA.

PRISMA 2020 flow diagram for new systematic reviews which included searches of databases and registers only



Fonte: Adaptado de Page et al. (2021).

5.2 Históricos das Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Mundo

As Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs), também conhecidas internacionalmente como *Pumped Storage Hydropower* (PSH), constituem a tecnologia de armazenamento de energia elétrica mais antiga e amplamente difundida em escala mundial. Sua trajetória histórica está diretamente associada à evolução dos sistemas elétricos, às mudanças no perfil de geração e, mais recentemente, aos desafios impostos pela transição energética e pela crescente participação de fontes renováveis intermitentes.

Os primeiros registros de sistemas de bombeamento reversível datam do início do século XX, com instalações experimentais na Europa e nos Estados Unidos voltadas à compensação

de variações diárias de carga em sistemas predominantemente térmicos e hidrelétricos convencionais. Entretanto, foi a partir do período pós-Segunda Guerra Mundial que as UHRs passaram a desempenhar papel estruturante nos sistemas elétricos, especialmente em países industrializados, como resposta à necessidade de otimização da operação de grandes usinas nucleares e térmicas de base, cujas características técnicas dificultavam ajustes rápidos de carga (BLANKERS et al., 2021; KILLINGTVEIT, 2013).

Entre as décadas de 1960 e 1980 ocorreu a principal fase de expansão das UHRs em escala global. Nesse período, países como Estados Unidos, Japão, Alemanha, França e Itália incorporaram massivamente essa tecnologia como solução para o armazenamento de energia em larga escala, aproveitando desníveis topográficos favoráveis e reservatórios existentes. Nos Estados Unidos, por exemplo, grande parte da capacidade instalada atual foi construída antes da década de 1990, com projetos predominantemente do tipo *open-loop*, conectados diretamente a cursos d'água naturais (RUSSO, 2019; SAULSBURY, 2020).

A partir da década de 1990, observa-se uma desaceleração na implantação de novas UHRs em países desenvolvidos, associada a fatores como o aumento da complexidade regulatória, o fortalecimento da legislação ambiental, a oposição social a grandes obras hidráulicas e a liberalização dos mercados de energia elétrica. Estudos indicam que, nesse período, o licenciamento ambiental e os custos associados à mitigação de impactos passaram a constituir os principais entraves à viabilização de novos empreendimentos, especialmente em projetos com barramentos em rios livres (ORNL, 2019; NREL, 2021).

No início do século XXI, a trajetória das UHRs passa por uma inflexão relevante, impulsionada pela expansão acelerada das fontes renováveis variáveis, em especial a energia eólica e solar fotovoltaica. A necessidade de flexibilidade operativa, armazenamento de longa duração e serviços ancilares ao sistema elétrico recoloca as UHRs no centro das estratégias energéticas de diversos países. Nesse novo contexto, destaca-se o avanço dos projetos do tipo *closed-loop*, caracterizados por reservatórios fora de cursos d'água naturais, os quais apresentam impactos ambientais mais localizados e, em geral, menor interferência sobre ecossistemas aquáticos (SAULSBURY, 2020).

A China representa o caso mais emblemático da expansão recente das UHRs. A partir da década de 2000, o país adotou uma política estatal de planejamento centralizado que reconhece

explicitamente o papel estratégico do armazenamento hidrelétrico para a integração de renováveis e a estabilidade do sistema elétrico. Como resultado, a capacidade instalada chinesa ultrapassou 50 GW, com centenas de projetos adicionais em diferentes fases de planejamento e construção, configurando o maior parque mundial de UHRs (ZHANG et al., 2015; PANG et al., 2025). Apesar desse avanço, a literatura aponta desafios relacionados a impactos socioambientais, uso do solo e necessidade de aprimoramento dos mecanismos regulatórios e de participação pública.

Na União Europeia, a trajetória recente das UHRs está fortemente associada à modernização de instalações existentes, à repotenciação de empreendimentos antigos e à adoção de soluções com menor impacto ambiental. Relatórios institucionais indicam que a expansão futura da hidreletricidade europeia dependerá majoritariamente de UHRs, dada a limitação de novos sítios para grandes barramentos e o elevado grau de proteção ambiental dos cursos d'água (EUROPEAN COMMISSION, 2023). Nesse contexto, observa-se uma crescente integração entre políticas energéticas, ambientais e territoriais.

Nos Estados Unidos, embora a maior parte da capacidade instalada seja histórica, há um renovado interesse em novos projetos, impulsionado por iniciativas federais voltadas à redução de prazos de licenciamento e ao reconhecimento dos serviços sistêmicos prestados pelas UHRs. Programas como o FAST Commissioning buscam mitigar riscos regulatórios sem comprometer os padrões ambientais, refletindo uma mudança gradual na abordagem institucional em relação à tecnologia (ORNL, 2019).

De forma geral, a análise histórica evidencia que a trajetória das UHRs no mundo não é linear, mas fortemente condicionada por fatores técnicos, econômicos, regulatórios e socioambientais. A literatura internacional converge no entendimento de que, embora se trate de uma tecnologia madura, seu futuro depende da capacidade dos marcos regulatórios de diferenciar tipologias, reconhecer impactos reais e integrar o licenciamento ambiental ao planejamento energético de longo prazo (BLANKERS et al., 2021; SAULSBURY, 2020).

5.3 Modelos de Regulação em Outros Países

No contexto brasileiro, observa-se que ainda não há procedimento específico ou menção expressa às Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) nos dispositivos legais aplicáveis aos aproveitamentos hidrelétricos, o que evidencia uma lacuna regulatória no tratamento dessa

tecnologia. Conforme destacado no *Roadmap Usinas Hidrelétricas Reversíveis – Perspectivas e caminhos para a inserção das usinas reversíveis no Brasil*, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a inserção das UHRs na matriz elétrica nacional demanda adaptações regulatórias relacionadas à outorga, ao acesso à rede e aos mecanismos de remuneração, bem como alinhamento institucional entre os diversos agentes envolvidos (EPE, 2025).

O referido documento sistematiza os principais desafios e caminhos regulatórios para viabilizar a inserção dessas usinas no Sistema Elétrico Brasileiro, apontando a necessidade de adequações na regulação de acesso à rede (definição MUST, CUST e TUST), na estrutura de outorgas e na definição de modelos remuneratórios compatíveis com os atributos de capacidade e flexibilidade das UHRs (EPE,2025). Ademais, o Roadmap destaca que, embora o desenho de mercado brasileiro já permita, em tese, a atuação de tecnologias de armazenamento, ainda são necessários aprimoramentos normativos para caracterizar adequadamente seus compromissos de entrega e formas de remuneração.

Em contraste, a experiência internacional demonstra maior maturidade institucional no tratamento regulatório das usinas reversíveis, com adoção de mecanismos específicos de remuneração e enquadramento regulatório compatíveis com seus múltiplos serviços sistêmicos. Países como China, Alemanha, Estados Unidos e Portugal estruturaram modelos que contemplam receita fixa, mercados de capacidade, mecanismos de confiabilidade ou isenções tarifárias, evidenciando abordagens diferenciadas para viabilizar a inserção dessa tecnologia nos respectivos sistemas elétricos (EPE, 2025).

A experiência norte-americana demonstra que a consolidação da inserção do *Pumped Storage Hydropower* (PSH) nos mercados de energia depende de avanços regulatórios específicos voltados ao reconhecimento de suas características operacionais e de seus múltiplos serviços ao sistema elétrico. Conforme destaca Russo (2019), um dos principais obstáculos enfrentados pelos desenvolvedores consiste na dificuldade de valorar e precificar adequadamente os diversos serviços ancilares prestados pelo PSH à confiabilidade do sistema, tais como regulação de frequência, reserva sincronizada, controle de tensão e serviço de *black start* (partida a frio). Nesse contexto, a edição da FERC Order 841 representou um marco ao estabelecer diretrizes para remover barreiras à participação dos sistemas de armazenamento,

inclusive o PSH, nos mercados atacadistas de capacidade, energia e serviços ancilares, reconhecendo suas especificidades físicas e operacionais. Assim, a experiência regulatória analisada evidencia que o aprimoramento normativo e a adequada remuneração dos atributos de flexibilidade e armazenamento constituem elementos centrais para a viabilização econômica e institucional dessa tecnologia (RUSSO, 2019).

A análise dos modelos de regulação aplicáveis às Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) em diferentes países evidencia que o sucesso ou a estagnação dessa tecnologia não decorre apenas de fatores técnicos ou econômicos, mas, sobretudo, da forma como os marcos regulatórios incorporam suas especificidades no licenciamento ambiental e no planejamento energético. Estudos sobre a experiência norte-americana indicam que a ausência de enquadramento regulatório próprio para empreendimentos de armazenamento, incluindo o *pumped storage hydropower*, resultou na aplicação de procedimentos concebidos para hidrelétricas convencionais, com impactos diretos sobre prazos, custos e previsibilidade regulatória (BLANKERS et al., 2021; SAULSBURY, 2020).

No contexto dos Estados Unidos, por exemplo, a submissão de projetos de *pumped storage* aos mesmos ritos previstos no *Federal Power Act* para aproveitamentos hidrelétricos tradicionais foi apontada como fator de morosidade e insegurança regulatória, especialmente antes da consolidação de procedimentos diferenciados para projetos *closed-loop* (SAULSBURY, 2020). De modo semelhante, análises sobre barreiras regulatórias ao armazenamento hidrelétrico destacam que o tratamento indistinto entre usinas convencionais e usinas reversíveis tende a desconsiderar diferenças relevantes quanto à magnitude e à natureza dos impactos ambientais, configurando entrave institucional à expansão dessa tecnologia (BLANKERS et al., 2021).

Assim, a literatura técnica não apenas reconhece a necessidade de diferenciação regulatória, como demonstra que a aplicação automática de normas destinadas a usinas hidrelétricas convencionais pode comprometer a viabilidade de projetos de UHRs, sobretudo em contextos marcados por maior rigor ambiental e ampliação da participação social nos processos decisórios.

5.3.1 Estados Unidos: Limitações do Modelo Regulatório e Entraves no Licenciamento

Nos Estados Unidos, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs), denominadas *Pumped Storage Hydropower* (PSH), estão submetidas ao regime federal de licenciamento previsto no *Federal Power Act* (FPA), sendo a competência regulatória atribuída à *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC). Compete à FERC autorizar, licenciar e supervisionar projetos hidrelétricos não federais, incluindo empreendimentos de armazenamento por bombeamento, nos termos de seus regulamentos e diretrizes institucionais (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION, 2015; LEVINE *et al.*, 2021).

O processo de licenciamento federal é estruturado em modalidades procedimentais formalizadas – *Integrated Licensing Process* (ILP), *Traditional Licensing Process* (TLP) e *Alternative Licensing Process* (ALP) – e envolve etapas obrigatórias como apresentação de *Notice of Intent*, definição de escopo de estudos, elaboração de *Environmental Assessment* (EA) ou *Environmental Impact Statement* (EIS), consultas a agências federais e estaduais e a autoridades tribais reconhecidas federalmente, além da emissão da licença e monitoramento das condicionantes (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION, 2015; LEVINE *et al.*, 2021).

Conforme descrito no *Handbook for Hydroelectric Project Licensing and 5 MW Exemptions from Licensing*, publicado pela *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC, 2004), o processo de licenciamento de empreendimentos hidrelétricos sob a competência federal compreende etapas formais estruturadas e sequenciais. De acordo com o referido manual, o licenciamento envolve:

- Apresentação de *Notice of Intent* (NOI);
- Consultas obrigatórias com agências federais, estaduais e com autoridades governamentais de nações indígenas reconhecidas federalmente;
- Elaboração de estudos ambientais, nos termos da *National Environmental Policy Act* (NEPA), incluindo *Environmental Assessment* (EA) e, quando aplicável, *Environmental Impact Statement* (EIS);
- Eventual aplicação da Seção 10(j) do *Federal Power Act* (FPA), relativa à proteção de recursos pesqueiros e ambientais;
- Emissão da licença e posterior monitoramento das condicionantes estabelecidas.

Essa estrutura procedimental evidencia a elevada formalização do modelo norte-americano, caracterizado por múltiplas fases de consulta, produção de estudos técnicos e interação interinstitucional, o que, embora fortaleça os mecanismos de controle ambiental e participação pública, também contribui para a extensão temporal do processo (FERC, 2004).

A literatura técnica analisada indica que a complexidade procedimental e a multiplicidade de interações institucionais configuram um dos principais entraves ao desenvolvimento de novos projetos de PSH no país. Estudos conduzidos no âmbito do *Department of Energy* (DOE), especialmente na iniciativa *HydroWIREs*, apontam que os ciclos de desenvolvimento de empreendimentos de armazenamento hidrelétrico frequentemente ultrapassam uma década, considerando as fases de estudos, licenciamento, financiamento e construção (HADJERIOUA et al., 2019, 2020).

No plano ambiental, observa-se que, historicamente, os projetos de PSH foram enquadrados sob o mesmo regime aplicável às hidrelétricas convencionais, independentemente da tipologia do empreendimento. Estudos recentes do DOE destacam, contudo, que sistemas *closed-loop*, por não manterem conexão hidráulica contínua com corpos hídricos naturais, tendem a apresentar impactos aquáticos mais localizados e, em determinados contextos, potencialmente inferiores aos sistemas *open-loop*, que operam diretamente conectados a rios ou reservatórios naturais (HADJERIOUA et al., 2020; JACOBSON et al., 2023). Essa distinção técnica tem fundamentado discussões sobre a necessidade de abordagens regulatórias mais diferenciadas.

Outro entrave identificado na literatura refere-se à viabilidade econômico-regulatória dos empreendimentos. Conforme analisado por Russo (2019), um dos principais desafios enfrentados pelos desenvolvedores de PSH reside na adequada valoração e precificação dos múltiplos serviços ancilares prestados ao sistema elétrico, tais como regulação de frequência, reserva sincronizada, controle de tensão e *black start*. Embora a FERC tenha avançado no reconhecimento da participação de recursos de armazenamento nos mercados atacadistas por meio da Order 841, persistem debates e desafios na implementação tarifária e na modelagem de participação nos mercados organizados (RUSSO, 2019).

Dados apresentados por Russo (2019) indicam que, embora o PSH represente a maior parcela do armazenamento de energia em escala utilitária nos Estados Unidos, o número de novos projetos licenciados nas últimas décadas permanece limitado, evidenciando barreiras estruturais associadas tanto ao licenciamento ambiental quanto à incerteza econômica.

Adicionalmente, observa-se que o arcabouço regulatório norte-americano tende historicamente a enquadrar empreendimentos de *Pumped Storage Hydropower* (PSH) dentro das mesmas estruturas normativas aplicáveis às hidrelétricas convencionais, especialmente no âmbito do *Federal Power Act* e dos procedimentos conduzidos pela *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC). Esse enquadramento deriva da evolução incremental do regime regulatório hidrelétrico, no qual novas tecnologias de armazenamento foram incorporadas sem a criação de categorias jurídicas plenamente diferenciadas, resultando na aplicação de processos extensos de licenciamento ambiental e avaliação de impactos originalmente concebidos para barragens fluviais tradicionais. Como consequência, projetos de PSH enfrentam exigências procedimentais complexas envolvendo múltiplas autorizações federais, estaduais e tribais, além da necessidade de atender simultaneamente a legislações ambientais diversas como o *National Environmental Policy Act*, o *Clean Water Act* e o *Endangered Species Act*, o que contribui para prazos prolongados, custos elevados e incertezas regulatórias (LEVINE et al., 2021; OLADOSU et al., 2020).

Estudos indicam que a estrutura de licenciamento hidrelétrico nos Estados Unidos envolve número elevado de stakeholders e etapas processuais, refletindo um modelo desenvolvido para lidar com impactos ecológicos associados a hidrelétricas convencionais conectadas a cursos d'água naturais, mesmo quando aplicado a projetos de armazenamento com características técnicas distintas (FERC, 2004; LEVINE et al., 2021). Essa ausência de diferenciação normativa tem sido apontada como um dos fatores que dificultam a expansão da tecnologia, pois amplia os riscos de investimento e contribui para ciclos de desenvolvimento que podem ultrapassar uma década, evidenciando a necessidade de adaptação regulatória capaz de reconhecer as especificidades operacionais e ambientais das usinas reversíveis no contexto da transição energética norte-americana (HADJERIOUA et al., 2019; KARAMBELKAR et al., 2025).

Assim, o modelo norte-americano caracteriza-se por elevada formalização institucional e transparência procedimental, mas apresenta limitações relacionadas à complexidade do licenciamento federal, à duração dos ciclos de desenvolvimento e aos desafios de integração econômica dos serviços prestados pelas UHRs. A literatura técnica recente sugere que a superação desses entraves depende de maior diferenciação regulatória entre tipologias de

projetos, aprimoramentos nos mecanismos de remuneração e iniciativas voltadas à racionalização procedimental (HADJERIOUA et al., 2019; RUSSO, 2019).

5.3.2 União Europeia: Rigor Ambiental e Integração com o Planejamento Energético

No contexto da União Europeia, a regulação aplicável às Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) insere-se em um arcabouço normativo ambiental supranacional estruturado por diretivas comunitárias que orientam os processos autorizativos em nível nacional. Diferentemente do modelo norte-americano, cuja análise concentra-se na estrutura federal de licenciamento, o modelo europeu caracteriza-se por uma forte base normativa ambiental harmonizada entre os Estados-Membros, ainda que implementada por meio de legislações nacionais próprias.

Os empreendimentos hidrelétricos, incluindo sistemas de armazenamento por bombeamento, submetem-se às exigências decorrentes da Diretiva-Quadro da Água (2000/60/CE), da Diretiva Habitats (92/43/CEE) e da Diretiva de Avaliação de Impacto Ambiental (2011/92/UE), as quais estabelecem parâmetros mínimos para a proteção de corpos hídricos, conservação de habitats e realização de estudos ambientais prévios para projetos com potencial impacto significativo. Conforme destacado nos relatórios setoriais sobre hidropotencial europeu, tais instrumentos condicionam a viabilidade de novos empreendimentos à demonstração de compatibilidade com metas de bom estado ecológico e proteção de áreas sensíveis (QUARANTA et al., 2023).

Estudos sobre o desenvolvimento do armazenamento hidrelétrico na Alemanha e na Polônia evidenciam que, embora as diretrizes comunitárias sejam comuns, a implementação administrativa varia entre os Estados-Membros quanto à duração dos procedimentos, às exigências técnicas e às condicionantes ambientais (KULPA et al., 2024; STEFFEN, 2011). Essa heterogeneidade decorre da internalização das diretivas por meio de legislações nacionais, o que confere ao sistema europeu simultaneamente harmonização normativa e diversidade procedimental.

No que se refere aos impactos ambientais, análises técnicas indicam que sistemas *closed-loop* tendem a apresentar impactos mais localizados quando não implicam a criação de novos barramentos em cursos d'água naturais, sobretudo por reduzirem a interação contínua com corpos hídricos naturais (PUJADES et al., 2021; QUARANTA et al., 2025). Contudo, os

documentos analisados não indicam a existência de regime regulatório europeu específico exclusivo para UHRs, sendo tais projetos avaliados no âmbito do regime geral aplicável aos empreendimentos hidrelétricos.

Ainda segundo Quaranta et al. (2023), o relatório setorial sobre hidrelétricas na União Europeia destaca que o desenvolvimento de novas usinas convencionais em rios livres tornou-se progressivamente mais restrito em diversos países, em razão das metas de conservação ambiental e da saturação do potencial técnico remanescente. Nesse contexto, observa-se a priorização de estratégias como modernização de usinas existentes, aumento de eficiência e expansão da capacidade de armazenamento por meio de UHRs.

Sob o ponto de vista do planejamento energético, as UHRs são reconhecidas como instrumentos estratégicos para a integração de fontes renováveis e para a garantia de flexibilidade sistêmica. Estudos prospectivos sobre a transição energética europeia destacam que o armazenamento hidrelétrico por bombeamento permanece como a tecnologia de armazenamento em larga escala mais consolidada do continente, desempenhando papel central na estabilização de sistemas com alta penetração de fontes eólica e solar (PUNYS et al., 2013; STOLTEN; SCHERER, 2013). O capítulo dedicado à hidreletricidade na obra *Transition to Renewable Energy Systems* destaca que a modalidade de bombeamento reversível constitui elemento central na oferta de serviços sistêmicos e na estabilidade de redes com elevada penetração de renováveis (KILLINGTVEIT, 2013, p. 389-398).

Análises sobre o potencial de armazenamento na Europa indicam que a expansão das UHRs está diretamente vinculada aos cenários de descarbonização e à necessidade de ampliação da capacidade de armazenamento de longo prazo, especialmente de sistemas com metas climáticas mais ambiciosas (LACAL ARÁNTEGUI; FITZGERALD; LEAHY, 2012). Assim, a integração entre planejamento energético e licenciamento ambiental ocorre na medida em que projetos de armazenamento são enquadrados como infraestruturas estratégicas para a transição energética, ainda que sujeitos a rigorosa avaliação ambiental.

Observa-se, no contexto europeu, uma tendência histórica de enquadrar Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) dentro de marcos normativos originalmente concebidos para hidrelétricas convencionais, o que tem gerado desafios regulatórios e operacionais específicos. Embora a hidreletricidade desempenhe papel estratégico na estabilidade do sistema elétrico e

na integração de fontes renováveis variáveis, a aplicação de requisitos ambientais e procedimentos voltados a barragens tradicionais nem sempre reflete adequadamente as características técnicas das UHRs, especialmente em configurações *closed-loop* ou *off-river*, que apresentam impactos ambientais potencialmente distintos e, em alguns casos, reduzidos (BLAKERS et al., 2021).

Na União Europeia, o fortalecimento das políticas ambientais, aliado à fragmentação dos regimes nacionais de licenciamento, contribui para processos regulatórios complexos, frequentemente baseados em pressupostos relacionados a aproveitamentos hidrelétricos fluviais convencionais, mesmo quando se trata de projetos focados prioritariamente em armazenamento energético e serviços de flexibilidade sistêmica (QUARANTA et al., 2023, 2024). Tal abordagem pode resultar em dificuldades na classificação funcional das UHRs, incluindo ambiguidades sobre a natureza renovável da energia gerada em sistemas híbridos ou mistos, evidenciando limitações dos instrumentos regulatórios existentes em capturar as especificidades tecnológicas dessas instalações (PUNYS et al., 2013). Nesse contexto, estudos sobre a transição energética destacam que a evolução dos sistemas energéticos requer não apenas inovação tecnológica, mas também adaptação institucional e normativa, de modo a alinhar os marcos regulatórios às funções emergentes de armazenamento e flexibilidade desempenhadas pelas UHRs no planejamento energético europeu (STOLTEN; SCHERER, 2013).

Com base nos documentos analisados, o modelo europeu pode ser caracterizado por:

- a) Base normativa ambiental harmonizada em nível supranacional, com exigências mínimas comuns estabelecidas por diretivas ambientais (QUARANTA et al., 2023, 2024; RANGONI, 2012);
- b) Internalização das diretrizes comunitárias por meio de legislação nacional, resultando em variações procedimentais entre Estados-Membros (KULPA et al., 2024; STEFFEN, 2011);
- c) Reconhecimento das UHRs como tecnologia estratégica para integração de renováveis e segurança de suprimento (LACAL ARÁNTGUI; FITZGERALD; LEAHY, 2012; PUNYS et al., 2013; QUARANTA et al., 2025; STOLTEN; SCHERER, 2013);
- d) Inexistência de regime jurídico próprio para UHRs, que permanecem submetidas ao marco regulatório aplicável às hidrelétricas convencionais (QUARANTA et al., 2024, 2025; RANGONI, 2012).

Conclui-se que o modelo da União Europeia combina elevado grau de rigor ambiental com integração progressiva das UHRs às estratégias de transição energética. Todavia, a efetividade e a celeridade dos processos autorizativos dependem do arranjo institucional e da capacidade administrativa de cada Estado-Membro, o que explica as diferenças observadas na implementação prática dos projetos de armazenamento por bombeamento no território europeu.

5.3.3 China: Planejamento Centralizado e Licenciamento Subordinado à Política Energética

A trajetória de desenvolvimento das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) na China está diretamente vinculada ao modelo de governança do setor elétrico, caracterizado por forte coordenação estatal e planejamento energético de longo prazo. Conforme analisado por Zhang, Andrews-Speed e Perera (2015), a expansão do armazenamento hidrelétrico por bombeamento integra explicitamente a estratégia chinesa de transição energética, especialmente no contexto de crescente penetração de fontes renováveis intermitentes, como a energia eólica.

O aumento significativo da capacidade eólica instalada no país, acompanhado de elevados índices de *curtailment*, evidenciou limitações estruturais do sistema elétrico quanto à flexibilidade operacional. Nesse cenário, o armazenamento por bombeamento passou a ser reconhecido como solução técnica capaz de oferecer serviços de regulação de frequência, reserva girante, suprimento de pico e compensação da variabilidade das renováveis (ZHANG; ANDREWS-SPEED; PERERA, 2015).

A literatura indica que, embora a China tenha estabelecido metas ambiciosas para a expansão da capacidade instalada de UHRs, a efetivação desses objetivos esteve historicamente condicionada por entraves institucionais e regulatórios. Zhang, Andrews-Speed e Perera (2015) identificam que restrições tarifárias, modelos de precificação inadequados e ausência de incentivos compatíveis com os serviços sistêmicos prestados pelas UHRs limitaram, por anos, a atratividade dos investimentos do setor.

A evolução do regime regulatório revela tentativa de superação dessas limitações. O estudo *The Evolving Policy Regime for Pumped Storage Hydroelectricity in China* demonstra que reformas recentes buscaram ajustar mecanismos tarifários e integrar de forma mais consistente o armazenamento ao planejamento da expansão do sistema elétrico nacional (ZHANG; ANDREWS-SPEED; PERERA, 2015). Tal movimento indica progressiva institucionalização das UHRs como componente estratégico da política energética chinesa.

No que se refere ao licenciamento ambiental, observa-se que este não opera de forma isolada, mas inserido em estrutura decisória mais ampla, na qual o planejamento energético nacional exerce papel determinante. Estudos sobre avaliação de impacto ambiental na China demonstram que metodologias específicas vêm sendo aplicadas à análise de empreendimentos hidrelétricos, incluindo abordagens multicritério para mensuração de impactos ambientais (LU; GAO; ZHAO, 2020). Contudo, a literatura também aponta desafios relacionados à consideração de impactos cumulativos e à necessidade de aprimoramento metodológico em avaliações ambientais complexas.

A rápida expansão da capacidade instalada de armazenamento por bombeamento, conforme evidenciado em análises recentes sobre o crescimento do setor (PANG *et al.*, 2025), confirma a efetividade do alinhamento entre planejamento energético e políticas públicas de incentivo. O armazenamento passa a desempenhar função estrutural na integração de renováveis e no suporte à estabilidade do sistema elétrico, conforme destacado também por estudos que analisam o papel estratégico das UHRs no sistema de potência chinês (PENG; HE; LIN, 2025).

Entretanto, a literatura especializada ressalta que a consolidação desse modelo ainda enfrenta desafios institucionais. Zhang, Andrews-Speed e Perera (2015) destacam que, apesar dos avanços normativos, persistem questões relativas à estrutura de mercado, à definição adequada de sinais econômicos e à coordenação entre operadores de rede e investidores. Tais aspectos demonstram que a eficácia do modelo chinês não decorre apenas do planejamento centralizado, mas também da contínua adaptação regulatória às exigências da transição energética.

Adicionalmente, observa-se que, no contexto chinês, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis têm sido, historicamente, enquadradas no arcabouço regulatório aplicável às hidrelétricas convencionais, especialmente no que se refere aos procedimentos de aprovação e aos regimes institucionais de operação e tarifação. Zhang, Andrews-Speed e Perera (2015) demonstram que, durante longo período, o desenvolvimento das UHRs esteve submetido às mesmas estruturas

administrativas e regulatórias do setor hidrelétrico tradicional, inclusive sob modelos de operação integrados às empresas de rede, o que limitou o reconhecimento específico de suas funções sistêmicas no suporte à integração de energias renováveis. Tal enquadramento refletiu-se na ausência inicial de mecanismos próprios de remuneração e em arranjos institucionais concebidos para usinas de geração convencional, não plenamente ajustados às características operacionais do armazenamento por bombeamento (ZHANG; ANDREWS-SPEED; PERERA, 2015). Estudos recentes indicam que, embora reformas regulatórias tenham buscado corrigir essas distorções e reconhecer o papel estratégico das UHRs na estabilidade do sistema elétrico, a estrutura normativa ainda guarda traços de sua vinculação histórica ao regime hidrelétrico geral, evidenciando um processo gradual de diferenciação regulatória no país.

Assim, a experiência chinesa evidencia um modelo no qual o armazenamento hidrelétrico por bombeamento é integrado explicitamente à política energética nacional, com progressivo aperfeiçoamento dos instrumentos regulatórios e econômicos que viabilizam sua expansão. Ao mesmo tempo, os estudos analisados indicam que a sustentabilidade de longo prazo do setor depende do aprimoramento permanente dos mecanismos de precificação, da governança institucional e dos instrumentos de avaliação ambiental.

5.3.4 Síntese Comparativa e Lacunas no Licenciamento Ambiental

A comparação entre os modelos regulatórios analisados evidencia que a principal lacuna comum reside na dificuldade de adaptar os instrumentos tradicionais de licenciamento ambiental às especificidades operacionais e ambientais das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs). Essa conclusão deriva da análise comparativa realizada nos casos dos Estados Unidos, da União Europeia e da China, nos quais a literatura aponta recorrente enquadramento dessas usinas em marcos normativos originalmente concebidos para hidrelétricas convencionais, mesmo quando se trata de sistemas de armazenamento energético com características técnicas distintas (BLANKERS et al., 2021; SAULSBURY, 2020; QUARANTA et al., 2023; ZHANG; ANDREWS-SPEED; PERERA, 2015).

No contexto norte-americano, estudos indicam que a aplicação do regime do *Federal Power Act* a projetos de *pumped storage* contribuiu historicamente para processos de licenciamento mais longos e complexos, especialmente antes da consolidação de discussões sobre diferenciação regulatória entre projetos *open-loop* e *closed-loop* (LEVINE et al., 2021; HADJERIOUA et al., 2019). De forma semelhante, na União Europeia, embora haja forte integração entre planejamento energético e proteção ambiental, os empreendimentos reversíveis continuam majoritariamente avaliados sob o regime geral da hidroeletricidade, o que pode gerar desafios relacionados à classificação funcional e à avaliação proporcional de impactos ambientais (QUARANTA et al., 2023; KILLINGTVEIT, 2013). Já no contexto chinês, a literatura demonstra que o desenvolvimento inicial das UHRs ocorreu dentro do arcabouço institucional hidrelétrico tradicional, sendo a diferenciação regulatória introduzida de forma gradual à medida que o papel do armazenamento energético foi reconhecido nas políticas nacionais de expansão do sistema elétrico (ZHANG; ANDREWS-SPEED; PERERA, 2015).

A partir da análise integrada desses contextos, observa-se que modelos regulatórios mais eficazes tendem a apresentar três características recorrentes:

- (i) Diferenciação normativa conforme a tipologia dos projetos e o grau de conectividade hídrica;
- (ii) Articulação entre licenciamento ambiental e planejamento energético de longo prazo;
- (iii) Reconhecimento explícito do valor sistêmico das UHRs como infraestrutura de armazenamento e flexibilidade energética.

A ausência desses elementos está associada, segundo a literatura analisada, a processos decisórios prolongados, aumento dos custos de mitigação ambiental e maior insegurança jurídica para investidores e órgãos reguladores.

Dessa forma, a síntese comparativa internacional reforça que o principal desafio regulatório não reside apenas no rigor ambiental adotado por cada jurisdição, mas na capacidade institucional de adaptar instrumentos existentes às especificidades tecnológicas das UHRs. Tal constatação fornece subsídios relevantes para o debate regulatório brasileiro, indicando a necessidade de um modelo de licenciamento ambiental proporcional ao impacto, integrado ao planejamento energético e estruturado a partir de critérios diferenciados para tecnologias de armazenamento hidroenergético.

Tabela 1 - Comparação preliminar dos modelos de regulação e licenciamento de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) em diferentes jurisdições internacionais (elaboração própria)

Aspecto Analisado	Estados Unidos (federal)	União Europeia	China	Publicações que fundamentam a linha
Autoridade licenciadora competente	<i>Federal Energy Regulatory Commission (FERC)</i> para empreendimentos de titularidade privada ou estadual, nos termos do <i>Federal Power Act</i> .	Licenciamento realizado pelas autoridades nacionais dos Estados-Membros; a União Europeia atua por meio de diretivas e marcos regulatórios supranacionais (ex.: Diretiva-Quadro da Água e Diretiva EIA), não exercendo licenciamento direto.	Administração Nacional de Energia (NEA) e órgãos governamentais centrais e provinciais, sob coordenação do planejamento energético estatal.	Estados Unidos: (FERC, 2004; FERC, 2015; HADJERIOUA et al., 2019) União Europeia: (EUROPEAN COMMISSION, 2023) China: (PENG; HE; LIN, 2025)
Instrumento legal primário aplicável	Nível Federal: <i>Federal Power Act</i> + <i>National Environmental Policy Act (NEPA)</i> .	Diretiva-Quadro da Água (2000/60/CE); Diretiva EIA (2011/92/UE); Diretiva Habitats (92/43/CEE).	Planos Quinquenais de Energia + Lei de Proteção Ambiental da China.	Estados Unidos: (FERC, 2004) União Europeia: (EUROPEAN COMMISSION, 2023) China: (PANG et al., 2025)

<p>Natureza do processo de licenciamento</p>	<p>Procedimento administrativo federal formal, com etapas estruturadas (pré-consulta, EIS/EA, decisão final).</p>	<p>Procedimento nacional condicionado às diretivas ambientais europeias; variação procedimental entre Estados-Membros.</p>	<p>Processo administrativo integrado ao planejamento energético nacional e às metas de capacidade.</p>	<p>Estados Unidos: (FERC, 2004; HADJERIOUA et al., 2019)</p> <p>União Europeia: (EUROPEAN COMMISSION, 2023)</p> <p>China: (PENG; HE; LIN, 2025)</p>
<p>Enquadramento das UHRs no regime hidrelétrico</p>	<p>Tradicionalmente enquadradas no regime geral hidrelétrico; reconhecimento recente de especificidades para projetos <i>closed-loop</i>.</p>	<p>Não aparenta haver categoria jurídica autônoma para UHRs; aplicam-se normas gerais de hidroeletricidade e proteção hídrica.</p>	<p>Classificadas como infraestrutura estratégica de armazenamento energético no contexto da transição energética.</p>	<p>Estados Unidos: (SAULSBURY, 2020; HADJERIOUA et al., 2019)</p> <p>União Europeia: (QUARANTA et al., 2023; EUROPEAN COMMISSION, 2023)</p> <p>China: (PENG; HE; LIN, 2025)</p>
<p>Exigência de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA)</p>	<p>Obrigatória sob NEPA (<i>Environmental Assessment</i> ou <i>Environmental Impact Statement</i>).</p>	<p>Obrigatória sob Diretiva EIA, internalizada pelos Estados-Membros.</p>	<p>Exigida conforme legislação ambiental nacional e avaliação de impacto específica.</p>	<p>Estados Unidos: (FERC, 2004)</p> <p>União Europeia: (EUROPEAN</p>

				COMMISSION, 2023) China: (PANG et al., 2025)
Diferenciação Regulatória entre open-loop e closed-loop	Reconhecimento crescente em processos recentes, especialmente para projetos closed-loop, com avaliações diferenciadas conforme conectividade hidráulica e magnitude dos impactos ambientais associados.	Não há regime jurídico específico uniforme; avaliação ocorre caso a caso com base na conectividade com corpos hídricos naturais e nos impactos aquáticos potenciais.	Não há regime jurídico distinto por tipologia; diferenciação tratada sob critérios técnicos e ambientais.	Estados Unidos: (SAULSBURY, 2020; HADJERIOUA et al., 2019) União Europeia: (QUARANTA et al., 2023) China: (PENG; HE; LIN, 2025)
Integração com planejamento energético nacional	Integração limitada entre planejamento energético e licenciamento ambiental, com processos frequentemente conduzidos de forma sequencial.	Integração indireta via metas climáticas e energéticas da UE internalizadas nacionalmente.	Forte integração com metas nacionais de neutralidade de carbono (2030–2060).	Estados Unidos: (RUSSO, 2019; HADJERIOUA et al., 2019) União Europeia: (KILLINGTVEIT, 2013; EUROPEAN COMMISSION, 2023) China: (PENG; HE; LIN, 2025)

<p>Previsibilidade normativa</p>	<p>Processo estruturado, porém sujeito a múltiplas intervenções institucionais.</p>	<p>Estrutura normativa estável, mas aplicação varia entre Estados-Membros.</p>	<p>Alta previsibilidade decorrente de planejamento centralizado.</p>	<p>Estados Unidos: (FERC, 2004; HADJERIOUA et al., 2019)</p> <p>União Europeia: (EUROPEAN COMMISSION, 2023)</p> <p>China: (PANG et al., 2025)</p>
<p>Participação pública</p>	<p>Consulta pública formal obrigatória sob NEPA.</p>	<p>Participação pública prevista na Diretiva EIA.</p>	<p>Participação prevista na legislação ambiental nacional.</p>	<p>Estados Unidos: (FERC, 2004)</p> <p>União Europeia: (EUROPEAN COMMISSION, 2023)</p> <p>China: (PANG et al., 2025)</p>
<p>Reconhecimento do valor sistêmico das UHRs</p>	<p>Reconhecimento técnico crescente; remuneração depende do mercado.</p>	<p>Reconhecimento como tecnologia-chave para integração de renováveis.</p>	<p>Reconhecimento explícito como instrumento estratégico de estabilidade sistêmica.</p>	<p>Estados Unidos: (HADJERIOUA et al., 2019; RUSSO, 2019)</p> <p>União Europeia: (KILLINGTVEIT, 2013; EUROPEAN COMMISSION, 2023)</p>

				China: (PANG et al., 2025; ZHANG et al., 2015)
Metas quantitativas de capacidade (capacidade instalada de armazenamento por bombeamento – GW)	Ausência de meta nacional específica exclusiva para PSH; desenvolvimento orientado por iniciativas de mercado e projetos individuais.	Metas variáveis entre Estados-Membros associadas a políticas de transição energética e armazenamento.	Projeções de expansão entre 120–234 GW até 2050 em cenários de neutralidade de carbono.	China: (PENG; HE; LIN, 2025)

Fonte: Elaboração própria com base na Revisão Sistemática da Literatura (PRISMA), incluindo exclusivamente os estudos selecionados no corpus final (ex.: Russo (2019), Saulsbury (2020), Blakers et al. (2021), Zhang et al. (2015), Pang et al. (2025), Hadjerioua *et al.* (2019), Yang e Jackson (2011), Peng, He e Lin (2025), European Commission (2023) e demais artigos incluídos na seção final).

5.4 Diretrizes Preliminares e Genéricas Propostas para a Regulamentação Brasileira das Usinas Hidrelétricas Reversíveis

A análise comparativa dos modelos regulatórios adotados nos Estados Unidos, na União Europeia e na China evidencia que a expansão das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) está diretamente associada à forma como os marcos normativos incorporam suas especificidades técnicas e ambientais. Embora os contextos institucionais sejam distintos, a literatura revisada converge no entendimento de que a aplicação indistinta das normas concebidas para usinas hidrelétricas convencionais constitui um dos principais entraves à viabilização de novos projetos de armazenamento por bombeamento (SAULSBURY, 2020; HADJERIOUA et al., 2019; BLANKERS et al., 2021).

Nos Estados Unidos, por exemplo, a equiparação histórica entre *pumped storage hydropower* (PSH) e hidrelétricas convencionais resultou na aplicação integral dos procedimentos previstos no *Federal Power Act* e no *National Environmental Policy Act* (NEPA), independentemente da tipologia do projeto (FERC, 2004; SAULSBURY, 2020). Apenas recentemente passou-se a reconhecer, em estudos técnicos federais, que projetos do tipo *closed-loop* apresentam impactos ambientais distintos e potencialmente mais localizados, especialmente sobre recursos aquáticos (SAULSBURY, 2020).

Na União Europeia, embora não exista uma categoria jurídica autônoma para UHRs, observa-se que o desenvolvimento de novos empreendimentos ocorre sob forte influência da Diretiva Quadro da Água e da Diretiva de Avaliação de Impacto Ambiental, o que impõe rigor ambiental. Contudo, a expansão recente tem priorizado modernizações, ampliações de instalações existentes e soluções com menor interferência hídrica, indicando reconhecimento prático das diferenças de impacto entre tipologias (QUARANTA et al., 2023; EUROPEAN COMMISSION, 2023).

Já na China, o planejamento energético centralizado define previamente a inserção estratégica das UHRs no sistema elétrico nacional, e o licenciamento ambiental ocorre de forma integrada às metas de expansão e neutralidade de carbono, o que confere maior previsibilidade institucional (ZHANG et al., 2015; PANG et al., 2025).

A partir dessas evidências verifica-se que os modelos regulatórios mais consistentes são aqueles que:

- Distinguem os impactos reais conforme a tipologia do projeto;
- Integram o licenciamento ambiental ao planejamento energético;
- Reconhecem o valor sistêmico das UHRs como infraestrutura de armazenamento.

Com base nesse conjunto de informações, propõem-se diretrizes orientadas não à flexibilização ambiental, mas à adequação técnica do processo de licenciamento às características específicas das UHRs, de modo a evitar distorções regulatórias decorrentes das aplicações automáticas de regras concebidas por barramentos convencionais em rios naturais.

5.4.1 Subsídios para uma Eventual Diretriz Geral: Licenciamento Ambiental Proporcional ao Impacto

A principal diretriz extraída da revisão sistemática da literatura refere-se à necessidade de estruturação de um modelo de licenciamento ambiental proporcional aos impactos efetivamente associados à tipologia e à configuração do empreendimento.

Estudos conduzidos no âmbito do Departamento de Energia dos Estados Unidos demonstram que sistemas *closed-loop*, por não manterem conexão permanente com corpos hídricos naturais, apresentam impactos aquáticos geralmente inferiores aos projetos *open-loop*, especialmente no que se refere à migração de peixes, alteração de regimes hidrológicos e conectividade fluvial (SAULSBURY, 2020). Essa distinção técnica é reiterada por análises de desenvolvimento de projetos norte-americanos que indicam diferenças substanciais na natureza dos estudos ambientais exigidos (HADJERIOUA et al., 2019).

Na literatura europeia, observa-se tendência semelhante: a restrição crescente à construção de novos barramentos em rios livres levou à priorização de projetos com menor interferência hídrica, incluindo repotenciações e sistemas de armazenamento associados a reservatórios existentes (QUARANTA et al., 2023; EUROPEAN COMMISSION, 2023).

Na China, embora o processo seja fortemente orientado pelo planejamento energético, estudos indicam que os critérios ambientais são modulados conforme as características técnicas do projeto e sua inserção territorial (PANG et al., 2025).

No caso chinês, a literatura indica que o enquadramento ambiental e administrativo dos projetos de Usinas Hidrelétricas Reversíveis está fortemente associado ao porte do empreendimento, medido em termos de capacidade instalada (GW). Projetos de maior escala, inseridos nos Planos Quinquenais e nos planos nacionais de energia, passam por processos de aprovação centralizados e avaliações ambientais estruturadas em nível nacional ou provincial, enquanto empreendimentos de menor porte tendem a ser analisados em instâncias subnacionais, com escopo técnico proporcional ao seu impacto potencial (PANG et al., 2025; ZHANG et al., 2015).

Nesse modelo, a capacidade instalada atua como critério objetivo de classificação administrativa do projeto, influenciando o nível decisório, a profundidade dos estudos exigidos e a integração com o planejamento energético. Embora não se trate de um critério ambiental isolado, a vinculação entre porte (GW) e grau de exigência regulatória evidencia um mecanismo prático de proporcionalidade regulatória, no qual empreendimentos de maior escala sistêmica

são submetidos a avaliações mais abrangentes, inclusive quanto a impactos cumulativos e regionais.

A experiência internacional analisada demonstra que a proporcionalidade regulatória não implica redução do rigor ambiental, mas sim a adequação do escopo e da profundidade dos estudos exigidos à magnitude, à natureza e à previsibilidade dos impactos associados a cada empreendimento. Nesse contexto, torna-se fundamental estabelecer, no Brasil, parâmetros objetivos de enquadramento que considerem de forma integrada a tipologia do projeto, sua localização e seu porte, evitando tanto a aplicação automática de exigências máximas desconectadas da realidade dos impactos efetivos quanto a subavaliação de empreendimentos com elevado potencial de impacto ambiental.

Nesse sentido, para o contexto brasileiro, recomenda-se que:

1. O enquadramento ambiental considere explicitamente a distinção entre projetos *open-loop* e *closed-loop*;
2. A exigência dos estudos EIA/RIMA seja fundamentada na análise prévia da conectividade hídrica, da supressão vegetal, da interferência em cursos naturais e do potencial de impactos cumulativos, dentre outros;
3. Projetos implantados em áreas antropizadas ou em reservatórios já existentes possam ser avaliados mediante estudos ambientais proporcionais à sua área de influência.

A literatura internacional demonstra que a ausência dessa diferenciação tende a gerar processos excessivamente longos e custos elevados de mitigação, mesmo em projetos cujos impactos são tecnicamente mais localizados (BLANKERS et al., 2021; SAULSBURY, 2020).

Assim, a diretriz da proporcionalidade fundamenta-se em evidências comparativas internacionais e consiste em alinhar o instrumento de avaliação ambiental à tipologia do empreendimento, garantindo simultaneamente proteção ambiental e coerência regulatória.

5.4.2 Requisitos Específicos para a Avaliação de Impactos Ambientais

A revisão sistemática da literatura evidencia que a avaliação de impactos ambientais de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) deve considerar as especificidades técnicas da tecnologia, especialmente no que se refere à tipologia do empreendimento, ao porte instalado e à interação com os recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Estudos comparativos indicam

que os projetos do tipo *closed-loop* apresentam, em regra, impactos mais localizados e menor interferência em ecossistemas fluviais quando comparados aos sistemas *open-loop*, que mantêm conexão hidráulica com cursos d'água naturais (BHATTARAI *et al.*, 2025; SAULSBURY, 2020).

Nesse sentido, recomenda-se que o licenciamento ambiental brasileiro estabeleça distinção expressa entre:

a) Recursos hídricos e conectividade hídrica

A avaliação deve distinguir claramente projetos *open-loop* e *closed-loop*, considerando a existência ou não de conexão permanente com corpos hídricos naturais. Para sistemas *closed-loop*, os impactos sobre ecossistemas aquáticos tendem a concentrar-se na fase de enchimento inicial e na reposição de perdas evaporativas, devendo ser avaliados de forma específica e localizada (SAULSBURY, 2020).

b) Hidrogeologia e aquíferos

Estudos indicam que projetos *closed-loop* que utilizam água subterrânea podem gerar impactos relevantes sobre aquíferos, exigindo avaliações hidrogeológicas detalhadas, especialmente quanto a alterações no fluxo, na qualidade da água e na disponibilidade para outros usos (PNNL, 2020; PANG *et al.*, 2025).

c) Uso e ocupação do solo

A implantação de reservatórios artificiais e infraestruturas associadas deve ser avaliada quanto à supressão vegetal, fragmentação de habitats e compatibilidade com o ordenamento territorial, priorizando áreas antropizadas ou estruturas preexistentes, conforme observado nas experiências europeias (EUROPEAN COMMISSION, 2023).

d) Impactos socioambientais e participação social

A literatura evidencia que conflitos socioambientais estão frequentemente associados a deficiências nos processos de consulta e participação pública, mesmo em projetos com menor impacto físico. Recomenda-se a adoção de mecanismos transparentes de participação social, especialmente em áreas com comunidades tradicionais ou usos múltiplos da água (KARAMBELKAR et al., 2025; PANG et al., 2025).

Além dos impactos citados anteriormente, o porte do empreendimento constitui variável relevante. A experiência chinesa demonstra que a expansão das UHRs ocorre por meio de projetos de grande capacidade instalada, frequentemente superior a 1 GW, integrados ao planejamento energético nacional (PENG; HE; LIN, 2025). Tal característica reforça a necessidade de que projetos de maior porte sejam submetidos à análise de impactos cumulativos e regionais, especialmente quando inseridos em sistemas elétricos de grande escala.

Adicionalmente, a literatura destaca a importância da análise hidrogeológica quando houver interação com aquíferos ou captação subterrânea, sobretudo em áreas com características geológicas sensíveis (PUJADES et al., 2021). A exigência de modelagem hidrogeológica específica deve ser condicionada à natureza da intervenção e à vulnerabilidade local.

Por fim, recomenda-se que os Termos de Referência para estudos ambientais incluam, quando pertinente, avaliação de impactos cumulativos e sinérgicos, conforme discutido na literatura sobre grandes empreendimentos hidrelétricos e armazenamento energético (OLADOSU et al., 2021).

5.4.3 Medidas Mitigadoras e Compensatórias

A literatura internacional aponta que os impactos ambientais associados às UHRs variam significativamente conforme a tipologia e a localização do empreendimento, sendo inadequada a aplicação automática de condicionantes típicas de hidrelétricas convencionais (BHATTARAI et al., 2025; PAPADAKIS; FAFALAKIS; KATSAPRAKAKIS, 2023).

Projetos *open-loop* demandam medidas voltadas à mitigação de alterações hidrológicas, controle de sedimentos, manutenção da qualidade da água e proteção da biota aquática. Já

empreendimentos *closed-loop* tendem a exigir maior atenção à gestão do uso do solo, à revegetação, ao controle de erosão e à estabilidade de taludes (PAPADAKIS; FAFALAKIS; KATSAPRAKAKIS, 2023; SAULSBURY, 2020).

Estudos sobre custos de mitigação em projetos hidrelétricos demonstram que medidas ambientais podem representar parcela significativa do investimento total, o que reforça a necessidade de proporcionalidade e adequação técnica das exigências (OLADOSU et al., 2021). A proporcionalidade regulatória, nesse contexto, não implica redução de rigor ambiental, mas adequação das medidas às características efetivas do impacto.

Recomenda-se, ainda, a adoção de programas de monitoramento ambiental contínuo com indicadores objetivos e revisões periódicas, prática observada em projetos internacionais de grande escala (ZHANG; ANDREWS-SPEED; PERERA, 2015). O monitoramento adaptativo contribui para a efetividade das medidas e para o aperfeiçoamento progressivo das condicionantes.

As compensações ambientais, quando necessárias, devem guardar nexos diretos com os impactos identificados e com a área de influência do empreendimento, evitando exigências desvinculadas da realidade territorial.

5.4.4 Integração entre Licenciamento Ambiental e Planejamento Energético

A análise comparativa internacional demonstra que a efetividade regulatória das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) está diretamente relacionada ao grau de articulação entre o licenciamento ambiental e o planejamento energético de longo prazo. Nos modelos em que essas esferas atuam de forma dissociada, observa-se aumento de incerteza regulatória, prolongamento dos prazos autorizativos e dificuldades na viabilização econômica dos empreendimentos (HADJERIOUA et al., 2019; RUSSO, 2019; BLANKERS et al., 2021).

Nos Estados Unidos, embora o licenciamento ambiental seja conduzido pela *Federal Energy Commission* (FERC) sob o *Federal Power Act* e em conformidade com o *National Environmental Policy Act* (NEPA), a literatura aponta que a integração com o planejamento energético é limitada. A decisão de licenciamento ocorre predominantemente em nível de

projeto, sem vinculação direta a metas nacionais de expansão de armazenamento ou integração sistêmica prévia no planejamento federal de energia (RUSSO, 2019; HADJERIOUA et al., 2019). Como consequência, mesmo empreendimentos reconhecidos como estratégicos para a estabilidade da rede enfrentam ciclos prolongados de desenvolvimento e incertezas quanto à valoração de seus serviços sistêmicos.

Na União Europeia, por sua vez, observa-se maior coerência estrutural entre política energética e exigências ambientais. As UHRs são reconhecidas como tecnologia-chave para a integração de fontes renováveis variáveis, especialmente no contexto da expansão eólica e solar (KILLINGTVEIT, 2013; EUROPEAN COMMISSION, 2023). Embora o licenciamento seja realizado pelos Estados-Membros, ele ocorre sob orientação de diretrizes comunitárias que articulam metas climáticas, segurança energética e proteção hídrica. Nesse modelo, o planejamento energético estabelece a necessidade sistêmica do armazenamento, e o licenciamento ambiental avalia a viabilidade local do empreendimento à luz dessas diretrizes estratégicas.

A experiência chinesa apresenta o grau mais elevado de integração institucional. As UHRs são incorporadas diretamente aos Planos Quinquenais de Energia e às metas nacionais de neutralidade de carbono, sendo classificadas como infraestrutura estratégica para a estabilidade do sistema elétrico (ZHANG et al., 2015; PANG et al., 2025). Nesse contexto, a decisão quanto à necessidade do empreendimento decorre previamente do planejamento energético centralizado. O licenciamento ambiental, embora obrigatório, ocorre de forma subordinada a essa diretriz estratégica, com definição de escopo proporcional ao porte do projeto e à sua relevância sistêmica. A capacidade instalada, medida em GW, influencia inclusive o nível decisório e a abrangência dos estudos exigidos (PANG et al., 2025).

A literatura internacional converge ao indicar que a integração entre planejamento energético e licenciamento ambiental não implica flexibilização de exigências ambientais, mas sim maior coerência decisória. O planejamento define a necessidade estratégica do armazenamento; o licenciamento ambiental, por sua vez, delimita as condições técnicas e territoriais para sua implementação (BLANKERS et al., 2021).

Para o contexto brasileiro, recomenda-se que essa integração ocorra por meio de:

- a) Incorporação explícita das UHRs nos estudos oficiais de planejamento energético de longo prazo, com identificação prévia de regiões tecnicamente adequadas à implantação;

- b) Definição de critérios objetivos de enquadramento ambiental que considerem tipologia (*open-loop* ou *closed-loop*), porte instalado e inserção territorial;
- c) Alinhamento entre estudos de expansão do setor elétrico e critérios ambientais estratégicos, reduzindo a sobreposição de análises e a insegurança jurídica;
- d) Reconhecimento formal do valor sistêmico das UHRs como infraestrutura de armazenamento e provisão de serviços ancilares.

A experiência comparada demonstra que, quando o licenciamento ambiental atua isoladamente, desvinculado das diretrizes energéticas estruturais, tende a ocorrer fragmentação decisória e aumento do risco regulatório. Em contrapartida, modelos que articulam planejamento energético e avaliação ambiental estratégica apresentam maior previsibilidade institucional e melhor coordenação entre expansão da infraestrutura e proteção ambiental (KILLINGTVEIT, 2013; ZHANG et al., 2015; EUROPEAN COMMISSION, 2023).

Dessa forma, a integração entre licenciamento ambiental e planejamento energético deve ser compreendida como mecanismo de coerência regulatória e não como instrumento de redução de controle ambiental, constituindo elemento essencial para a viabilização sustentável das Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil.

5.4.5 Síntese das Diretrizes Propostas

Com base na revisão sistemática dos estudos internacionais, propõe-se que a regulamentação brasileira das Usinas Hidrelétricas Reversíveis seja estruturada a partir dos seguintes eixos:

- I. Licenciamento ambiental proporcional à tipologia, ao porte e à localização do empreendimento, com distinção expressa entre sistemas *open-loop* e *closed-loop* (SAULSBURY, 2020);
- II. Exigência de estudos hidrogeológicos específicos quando houver interação com aquíferos ou captação subterrânea (PUJADES et al., 2021);

- III. Avaliação de impactos cumulativos para empreendimentos de grande capacidade instalada;
- IV. Adoção de medidas mitigadoras e compensatórias proporcionais, baseadas na natureza efetiva dos impactos identificados;
- V. Integração institucional entre licenciamento ambiental e planejamento energético, visando coerência regulatória e segurança jurídica.

Essas diretrizes não configuram flexibilização do controle ambiental, mas sim a construção de um modelo regulatório tecnicamente fundamentado e alinhado às melhores práticas internacionais observadas na literatura especializada.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar práticas internacionais de regulamentação do licenciamento ambiental de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) e discutir suas potenciais aplicações ao contexto brasileiro. A partir de uma revisão sistemática da literatura, conduzida segundo o protocolo PRISMA, foi possível identificar padrões regulatórios, convergências institucionais e lacunas normativas nos modelos adotados pelos Estados Unidos, pela União Europeia e pela China.

Os resultados demonstram que as UHRs constituem uma tecnologia estratégica para a transição energética, sobretudo em cenários de elevada penetração de fontes renováveis intermitentes. Sua capacidade de armazenamento em larga escala, provisão de serviços ancilares e estabilização sistêmica confere relevância estrutural à tecnologia, conforme amplamente reconhecido na literatura internacional. Entretanto, verificou-se que a expansão dessa modalidade não depende exclusivamente de fatores técnicos ou econômicos, mas está diretamente condicionada à forma como os marcos regulatórios incorporam suas especificidades ambientais e operacionais.

A análise comparativa evidenciou que um dos principais entraves regulatórios internacionais reside na aplicação indistinta de normas concebidas para hidrelétricas convencionais às UHRs, especialmente quando não há diferenciação entre projetos do tipo open-loop e closed-loop. Observou-se, ainda, que modelos mais eficazes são aqueles que articulam três elementos centrais: proporcionalidade regulatória baseada na tipologia e no porte do empreendimento; integração entre planejamento energético e licenciamento ambiental; e reconhecimento explícito do valor sistêmico das UHRs como infraestrutura de armazenamento estratégico.

Na China, destacou-se a vinculação entre a capacidade instalada e o nível decisório administrativo, o que evidencia um critério objetivo de enquadramento regulatório proporcional ao porte do empreendimento. Já na União Europeia, embora não exista categoria jurídica autônoma para UHRs, a integração entre metas energéticas e exigências ambientais demonstra maior coerência institucional. Nos Estados Unidos, por sua vez, identificaram-se avanços

recentes no reconhecimento das especificidades dos sistemas closed-loop, ainda que persistam desafios relacionados à duração e complexidade dos processos de licenciamento.

Para o contexto brasileiro, a pesquisa confirmou a existência de uma lacuna normativa específica quanto ao licenciamento ambiental de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs). Embora o país possua arcabouço consolidado para aproveitamentos hidrelétricos convencionais, não há previsão expressa que contemple as particularidades técnicas e ambientais do armazenamento reversível. Tal ausência pode gerar insegurança jurídica, imprevisibilidade procedimental e desestímulo ao investimento privado.

Com base nas evidências levantadas, conclui-se que a regulamentação brasileira deve adotar abordagem estruturada em torno da proporcionalidade ambiental, da diferenciação por tipologia e porte, da definição clara de requisitos específicos de avaliação de impactos e da integração institucional com o planejamento energético de longo prazo. Ressalta-se que proporcionalidade regulatória não implica redução do rigor ambiental, mas adequação técnica do escopo dos estudos e das medidas mitigadoras à magnitude e à natureza dos impactos previstos.

Por fim, destaca-se que o desenvolvimento de um marco regulatório específico para UHRs no Brasil pode contribuir significativamente para a modernização do setor elétrico nacional, ampliando a segurança energética, reduzindo riscos sistêmicos associados à variabilidade climática e fortalecendo a inserção de fontes renováveis na matriz energética. O licenciamento ambiental, quando adequadamente estruturado, deixa de ser um obstáculo e passa a constituir instrumento estratégico de viabilização sustentável dessa tecnologia.

7 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Valério Oscar de. *Hibridização de fontes de energia renováveis: estudo de caso de usina hidrelétrica reversível com usina fotovoltaica flutuante*. 2022. Monografia (Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

BRASIL. Lei nº 15.190, de 8 de agosto de 2025. Dispõe sobre o licenciamento ambiental [...]. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 ago. 2025.

CANALES, Fausto Alfredo; BELUCO, Alexandre; MENDES, Carlos André Bulhões. Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 1230–1249, maio/ago. 2015.

FARIAS, Talden. *Licenciamento ambiental: aspectos teóricos e práticos*. 9. ed. Salvador: JusPodivm, 2024.

GUIMARÃES, Alberto de Almeida Bossi. *Implantação de sistemas hidro reversíveis/fotovoltaicos em áreas degradadas pela mineração*. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

HUNT, Julian David; FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos de. Usinas hidrelétricas reversíveis sazonais e seus benefícios para o setor elétrico brasileiro. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE EMPREENDEDORISMO, ENERGIA, MEIO AMBIENTE E TECNOLOGIA – CIEEMAT, 2., 2016. Anais [...].

MOREIRA, Paulo Rodolpho de Oliveira. *Avaliação da usina hidrelétrica Henry Borden como usina reversível auxiliada por usina fotovoltaica flutuante*. 2023. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

PEREIRA, Charles. Conheça as usinas hidrelétricas reversíveis (UHRs). Blog da Engenharia, 23 jul. 2020. Disponível em: <<https://blogdaengenharia.com>>. Acesso em: 20 out. 2025.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SILVA, Daniely Ramalho. Estudo do custo nivelado de energia [...]. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

SOARES, Felipe Klein. Análise de viabilidade econômico-financeira de uma usina hidrelétrica reversível no Brasil. 2019. Dissertação (Mestrado) — PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2019.

APÊNDICE A – Estudos incluídos na revisão sistemática (Metodologia PRISMA)

ANDRITZ HYDRO. *Hydro News* 35. Viena: Andritz Hydro GmbH, 2022.

ARDIZZON, G.; CAVAZZINI, G.; PAVESI, G. A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: advances and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 31, p. 746–761, 2014.

BARBOUR, Edward et al. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 61, p. 421–432, 2016.

BAJAY, Sergio et al. Aspectos técnicos e operativos das UHRs no setor elétrico: as experiências internacionais. 2020. Disponível em: <<https://www.projetouhr.com.br>>.

BHATTARAI, Bibek et al. Pumped storage hydropower systems: a comprehensive review of innovations, resilience, and climate adaptation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, [S.l.], v. 1533, art. 012007, 2025.

BLAKERS, Andrew et al. A review of pumped hydro energy storage. *Progress in Energy*, [S.l.], v. 3, art. 022003, 2021.

BOŠNJAKOVIĆ, Mladen et al. SWOT-AHP analysis of the importance and adoption of pumped-storage hydropower. *Technologies*, [S.l.], v. 13, n. 7, art. 305, 2025.

BOTTERUD, Audun; LEVIN, Todd; KORITAROV, Vladimir. Pumped storage hydropower: benefits for grid reliability and integration of variable renewable energy. Argonne, IL: ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Roadmap usinas hidrelétricas reversíveis (UHR)*. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION (FERC). *Compliance handbook*. Washington, DC: Office of Energy Projects, 2015.

FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION (FERC). *Handbook for hydroelectric project licensing and 5 MW exemptions from licensing*. Washington, DC: FERC, 2004.

FERNANDEZ, Dane. *Modular pumped hydro energy storage (MPHES): relevance, concept design, economics and future prospect*. 2019. Dissertação (Mestrado) — Murdoch University, Perth, 2019.

HADJERIOUA, Boualem et al. Toward faster commissioning of pumped storage hydropower in the United States. In: HYDROVISION INTERNATIONAL CONFERENCE, 2019, Portland. Proceedings [...]. Portland, 2019.

HADJERIOUA, Boualem et al. *Pumped storage hydropower FAST commissioning technical analysis*. Oak Ridge, TN: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2020.

JACOBSON, Mark et al. An assessment of deploying advanced pumped storage hydropower technology in U.S. electricity markets. Golden, CO: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL), 2023.

KARAMBELKAR, Surabhi et al. Pumped storage hydropower in the United States: emerging importance, environmental and social impacts, and critical considerations. *WIRES Water*, [S.l.], v. 12, e70017, 2025.

KELMAN, Rafael; HARRISON, David L. Integrating renewables with pumped hydro storage in Brazil: a case study. [S.l.: s.n.], 2019.

KORITAROV, Vladimir et al. Modeling and analysis of value of advanced pumped storage hydropower in the United States. Argonne, IL: ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2014.

KULPA, Jarosław et al. Pumped storage hydropower as a part of energy storage systems in Poland—Młoty case study. *Energies*, [S.l.], v. 17, n. 8, art. 1830, 2024.

LACAL ARÁNTGUI, Roberto; FITZGERALD, Niall; LEAHY, Paul. Pumped-hydro energy storage: potential for transformation from single dams. Petten: Joint Research Centre (JRC), 2012.

- LEVINE, Aaron et al. An examination of the hydropower licensing and federal authorization process. Golden, CO: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL), 2021.
- LU, Zhiming; GAO, Yan; ZHAO, Wenhui. A TODIM-based approach for environmental impact assessment of pumped hydro energy storage plant. *Journal of Cleaner Production*, [S.l.], v. 248, art. 119265, 2020.
- OLADOSU, Gbadebo A. et al. Costs of mitigating the environmental impacts of hydropower projects in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 135, art. 110121, 2021.
- PANG, Mingyue et al. Pumped hydro energy storage plants in China: increasing demand and multidimensional impacts identification. *Energies*, [S.l.], v. 18, art. 1801, 2025.
- PAPADAKIS, Nikolaos C.; FAFALAKIS, Marios; KATSAPRAKAKIS, Dimitris. A review of pumped hydro storage systems. *Energies*, [S.l.], v. 16, n. 11, art. 4516, 2023.
- PAGE, Matthew J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, [S.l.], v. 372, 2021.
- PENG, Liqun; HE, Gang; LIN, Jiang. Role of pumped hydro storage in China's power system transition. *The Electricity Journal*, [S.l.], 2025.
- PUJADES, Estanislao et al. The impact of hydrogeological features on the performance of underground pumped-storage hydropower (UPSH). *Applied Sciences*, [S.l.], v. 11, art. 1760, 2021.
- PUNYS, Petras et al. Assessment of renewable electricity generation by pumped storage power plants in EU member states. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 26, p. 190–200, 2013.
- QUARANTA, Emanuele. Hydropower and pumped hydropower storage in the European Union. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023.

RANGONI, Bernardo. A contribution on the regulation of electricity storage: the case of hydro-pumped storage in Italy and Spain. London: London School of Economics, [20--].

RITTER, Michael. Kidston pumped storage project. *HydroNews*, Viena, n. 35, p. 10–13, 2022.

RUSSO, Thomas N. Pumped storage hydro: reliable choice for the new electric storage era. *Natural Gas & Electricity*, [S.l.], v. 36, n. 2, p. 27–31, 2019.

SAULSBURY, Bo et al. A comparison of the environmental effects of open-loop and closed-loop pumped storage hydropower. Richland, WA: PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY, 2020.

STEFFEN, Bjarne. Prospects for pumped-hydro storage in Germany. Essen: University of Duisburg-Essen, 2011.

STOLTEN, Detlef; SCHERER, Viktor (ed.). *Transition to renewable energy systems*. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.

TIWARI, Shardul; SCHELLY, Chelsea; SIDORTSOV, Roman. Developing a legal framework for energy storage technologies in the U.S.: the case of pumped underground storage hydro. *The Electricity Journal*, [S.l.], v. 34, art. 107048, 2021.

WITT, Adam et al. Development and implications of a predictive cost methodology for modular pumped storage hydropower projects in the United States. Oak Ridge, TN: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2016.

YANG, Chi-Jen; JACKSON, Robert B. Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 15, n. 1, p. 839–844, 2011.

YIN, Hailong et al. A review on ecological and environmental impacts of pumped hydro storage based on CiteSpace analysis. *Water*, [S.l.], v. 17, art. 2752, 2025.

ZHANG, Sufang; ANDREWS-SPEED, Philip; PERERA, Pradeep. The evolving policy regime for pumped storage hydroelectricity in China: a key support for low-carbon energy. *Applied Energy*, [S.l.], v. 150, p. 15–24, 2015.

QUARANTA, Emanuele. Hydropower and pumped hydropower storage in the European Union. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023.

RANGONI, Bernardo. A contribution on the regulation of electricity storage: the case of hydro-pumped storage in Italy and Spain. London: London School of Economics, [20--].

RUSSO, Thomas N. Pumped storage hydro: reliable choice for the new electric storage era. *Natural Gas & Electricity*, [S.l.], v. 36, n. 2, p. 27–31, 2019.

SAULSBURY, Bo et al. A comparison of the environmental effects of open-loop and closed-loop pumped storage hydropower. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2020.

STEFFEN, Bjarne. Prospects for pumped-hydro storage in Germany. Essen: University of Duisburg-Essen, 2011.

STOLTEN, Detlef; SCHERER, Viktor (ed.). *Transition to renewable energy systems*. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.

TIWARI, Shardul; SCHELLY, Chelsea; SIDORTSOV, Roman. Developing a legal framework for energy storage technologies in the U.S.: the case of pumped underground storage hydro. *The Electricity Journal*, [S.l.], v. 34, art. 107048, 2021.

WITT, Adam et al. Development and implications of a predictive cost methodology for modular pumped storage hydropower projects in the United States. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 2016.

YANG, Chi-Jen; JACKSON, Robert B. Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 15, p. 839–844, 2011.

YIN, Hailong et al. A review on ecological and environmental impacts of pumped hydro storage based on CiteSpace analysis. *Water*, [S.l.], v. 17, art. 2752, 2025.

ZHANG, Sufang; ANDREWS-SPEED, Philip; PERERA, Pradeep. The evolving policy regime for pumped storage hydroelectricity in China: a key support for low-carbon energy. *Applied Energy*, [S.l.], v. 150, p. 15–24, 2015.