

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência
Energética

LEONARDO AUGUSTO PEREIRA DE OLIVEIRA

Benefícios, Desafios e Perspectivas para as Usinas
Hidrelétricas Reversíveis – UHR no Brasil

SÃO PAULO
2024

LEONARDO AUGUSTO PEREIRA DE OLIVEIRA

Benefícios, Desafios e Perspectivas para as Usinas
Hidrelétricas Reversíveis – UHR no Brasil

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Energia Renovável, Geração Distribuída e em Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sacchi

SÃO PAULO

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Leonardo Augusto.

Benefícios, Desafios e Perspectivas para as Usina Hidrelétricas Reversíveis – UHR no Brasil. / Leonardo Augusto Pereira de Oliveira; Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sacchi – PECE/USP – São Paulo, 2024.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR), 2. Desafios e Perspectivas 3. Tecnologia

Nome: Oliveira, Leonardo Augusto Pereira

Título: Benefícios, Desafios e Perspectivas para as Usinas Hidrelétricas Reversíveis – UHRS no Brasil

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PECE, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Energia Renovável, Geração Distribuída e em Eficiência Energética.

Monografia defendida e aprovada pela comissão julgadora:

Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni – PECE/USP
Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. Rodrigo Sacchi – PECE/USP
Orientador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família, que sempre esteve ao meu lado em todas as etapas deste trabalho. Seu apoio incondicional, amor e incentivo foram essenciais para que eu pudesse superar os desafios e chegar até aqui. Foram inúmeros finais de semana que precisei conciliar entre o trabalho e os momentos com minha família e amigos. Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Sacchi, por seus valiosos conselhos e diversas perspectivas. Por fim, sou grato a todos os professores que tive a oportunidade de conhecer ao longo dessa jornada.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar os benefícios, desafios e perspectivas das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR), uma tecnologia crucial para a gestão eficiente e sustentável da energia elétrica. A pesquisa investiga as vantagens associadas a esse sistema, que incluem a capacidade de armazenamento de energia, a regularização da oferta e demanda, e a contribuição para a transição energética, promovendo a estabilidade e a flexibilidade do sistema elétrico.

Entretanto, os desafios são significativos. A construção de UHR demanda altos custos iniciais e enfrenta complexidades técnicas, além de questões relacionadas ao impacto ambiental e social nas áreas de implantação. A necessidade de investimentos em infraestrutura e a busca por tecnologias mais eficientes, juntamente com o desenvolvimento de mecanismos regulatórios que reconheçam seus benefícios, são obstáculos a serem superados.

As perspectivas para as UHR no Brasil são promissoras, especialmente com o aumento da geração de energia solar e eólica, que exige soluções de armazenamento para garantir a estabilidade do sistema. A integração das UHR com essas fontes renováveis pode potencializar a sustentabilidade do setor elétrico, alinhando-se às metas de redução das emissões de gases de efeito estufa.

Em síntese, as UHR representam uma alternativa estratégica para o futuro da energia no Brasil, demandando planejamento cuidadoso e investimentos para maximizar seus benefícios e mitigar os desafios enfrentados. A pesquisa é fundamentada em estudos desenvolvidos por universidades, artigos, reportagens, diretrizes governamentais e normas técnicas, visando preparar o setor para os desafios futuros. Apesar de ser uma tecnologia consagrada no Brasil, as UHRs ainda enfrentam entraves técnicos, regulatórios e ambientais que precisam ser abordados para garantir seu pleno potencial.

Palavras-Chave: Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR); Energia Renovável; Modulação de Carga.

ABSTRACT

This work aims to present the benefits, challenges and perspectives of Pumped Hydroelectric Plants (PHPs), a crucial technology for the efficient and sustainable management of electric energy. The research investigates the advantages associated with this system, which include energy storage capacity, regularization of supply and demand, and contribution to the energy transition, promoting the stability and flexibility of the electrical system.

However, the challenges are significant. The construction of PHPs requires high initial costs and faces technical complexities, as well as issues related to environmental and social impacts in the areas of implementation. The need for investments in infrastructure and the pursuit of more efficient technologies, along with the development of regulatory mechanisms that recognize their benefits, are obstacles to be overcome.

The prospects for PHPs in Brazil are promising, especially with the increase in solar and wind energy generation, which demands storage solutions to ensure system stability. The integration of PHPs with these renewable sources can enhance the sustainability of the electricity sector, aligning with goals to reduce greenhouse gas emissions.

In summary, PHPs represent a strategic alternative for the future of energy in Brazil, requiring careful planning and investment to maximize their benefits and mitigate the challenges faced. The research is based on studies conducted by universities, articles, reports, government guidelines, and technical standards, aiming to prepare the sector for future challenges. Despite being an established technology in Brazil, PHPs still face technical, regulatory, and environmental barriers that need to be addressed to ensure their full potential.

Keywords: Pumped Hydroelectric Plants (PHPs), Renewable Energy; Load Modulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemático de Funcionamento de Usina Hidrelétrica Reversível (adptado Hydro, 2021).	11
Figura 2 - Evolução da capacidade instalada de UHR no mundo (Fonte: IHA 2018)	14
Figura 3 - Distribuição da capacidade instalada de UHR no mundo em 2019 (Fonte: IHA 2020 adaptado)	15
Figura 4 - Representação do complexo Henry Borden no estado de São Paulo (Fonte: DAEE/SP, 2020)	18
Figura 5 - Representação do complexo de Lajes no estado do Rio de Janeiro (Fonte: Light, 2020)	19
Figura 6 - Projeção da capacidade instalada para o horizonte decenal. Valores em GW (Fonte: PDE 2030).....	20
Figura 7 - Desvios de frequência para diferentes constantes de inércia (H)	23
Figura 8 - Parâmetros Econômicos por tipo de fonte, PDE 2034.....	32
Figura 9 - Parâmetros Econômicos por tipo de fonte, PDE 2034.....	32
Figura 10 - Locais propícios a implantação de UHR identificados pelo GeoUHR para o RJ, classificados por desnível, Fonte: Elaboração EPE	45
Figura 11 - Locais propícios a implantação de UHR identificados pelo GeoUHR para o RJ, fora de áreas protegidas, classificados por desnível, Fonte: Elaboração EPE	45
Figura 12 - Locais propícios a implantação de UHR identificados pelo GeoUHR para o RJ, fora de áreas protegidas, classificados por relação L/H, Fonte: Elaboração EPE	46
Figura 13 - UHR Okinawa Yanbaru, utilização de água do mar.....	49
Figura 14 - Relatório sobre Curtailment, com dados disponibilizados pela ONS, elaborado pela EPOWERBAY.	51

Sumário

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 O que são hidrelétricas reversíveis.....	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 Evolução Histórica das UHR.....	14
2.1.1 As UHR no Mundo.....	14
2.2 As UHR no Brasil	16
3 PRODUTOS E APLICAÇÕES OFERECIDOS PELA UHR.....	21
3.1 Nivelamento de carga (arbitragem de energia)	21
3.2 Provimento de inércia	23
3.3 Reserva de potência para controle de frequência	24
3.4 Acompanhamento de carga	24
3.5 Redução de ciclos de unidades termelétricas	26
3.5.1..Redução da carga mínima do sistema e suporte à expansão da geração inflexível	26
3.6 Controle de reativos (controle de tensão)	26
3.7 Autorrestabelecimento (black-start).....	27
3.8 Redução do congestionamento, perdas elétricas e adiamento do investimento em novos ativos de transmissão	27
3.9 Usos exógenos ao setor elétrico	28
3.10 Suporte à expansão da geração de energia com fontes renováveis e baixos níveis de emissões de gases de efeito estufa (GEE).....	28
4 DESAFIOS PARA A INSERÇÃO DE NOVAS UHR	30
4.1 Projetos de engenharia específicos para as condições locais.....	31
4.2 Custos de implantação	31
4.3 Tempo de provisionamento	34
4.4 Empreendimentos multipropósitos	34
4.5 Valoração de benefícios e imprevisibilidade de receita.....	35
4.6 Aspectos regulatórios do armazenamento	36
4.7 Outorga para exploração de aproveitamentos hidrelétrico	38
4.8 Licenciamento ambiental	39
4.9 Outorga pelo direito de uso dos recursos hídricos	41
5 POTENCIAL DE UHR NO BRASIL	43
5.1 Resultados Preliminares do Estudo de Potencial no Rio de Janeiro-RJ	44
6 A IMPORTÂNCIA DAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS PARA INTEGRAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA.	50
7. RESUMO DOS PRINCIPAIS DESAFIOS PARA AS UHR E RECOMENDAÇÕES	53
8. CONCLUSÃO	56
9. REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

Em um contexto mundial de transição energética e crescente participação das fontes renováveis, os sistemas de armazenamento de energia têm ganhado destaque como forma de equilibrar a geração e o consumo, com benefícios reconhecidos relacionados à qualidade e confiabilidade dos sistemas elétricos. Nesse cenário, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) ressurgem como uma tecnologia de armazenamento natural, reconhecida por sua maturidade, eficiência e viabilidade econômica, especialmente em escalas sistêmicas.

Entretanto, a experiência internacional revela que as condições regulatórias e os modelos de negócios resultantes da reestruturação dos mercados de energia elétrica ainda não têm sido suficientes para fomentar um desenvolvimento robusto das UHR. Isso se aplica também ao Brasil, que, apesar de sua vocação para usinas hidrelétricas, enfrenta desafios semelhantes, conforme a matriz elétrica brasileira.

Este trabalho tem como objetivo destacar o papel fundamental das UHR nos sistemas elétricos do futuro, abordando as principais questões relacionadas ao desenvolvimento de novos projetos e à atração de investimentos. A pesquisa se concentra nas experiências internacionais e nacionais com UHR, enfatizando aspectos de mercado e regulação, além dos desafios enfrentados para a captação de novos investimentos.

Inclusive no cenário atual brasileiro as (UHR) poderão ser protagonistas na modulação da curva de carga, juntamente com a hidreletricas compensando a queda de geração solar após às 18hs, periodo este considerado horário de ponta e alto consumo.

Esse trabalho traz também uma breve descrição das principais aplicações das UHR nos sistemas elétricos e os potenciais benefícios decorrentes, indicando ainda os desafios e possíveis caminhos para a inserção desta tecnologia no Brasil.

O objetivo deste trabalho é apresentar os desafios e barreiras para o desenvolvimento da tecnologia UHR. Para tanto, é utilizado um conjunto de estudos e avaliações



Figura 2 - Hidrelétrica resersível e seus componentes básicos, UHR La Muela, grupo Iberdrola, Espanha

A geração de energia hidráulica se dá pela transformação da energia potencial de uma massa de água, armazenada em uma determinada altura, em energia mecânica por meio de uma turbina hidráulica, que aciona um gerador elétrico. Para que essa geração ocorra de forma contínua, é fundamental garantir um fluxo de água, o que geralmente requer a construção de um reservatório, frequentemente feito de concreto armado. Em outras palavras, os reservatórios são essenciais para criar uma queda d'água com uma vazão suficiente para gerar energia.

Assim, o principal desafio da geração hidráulica é a necessidade de um suprimento constante de água (rios) para manter os níveis dos reservatórios adequados ao funcionamento da usina. Cada gerador possui uma vazão mínima de água necessária para que a turbina acoplada funcione com condições mínimas operativas. Quando essa vazão não está disponível, uma solução viável é bombear água do reservatório inferior para o superior. Isso pode ser feito em rios com vazões mais fracas ou mesmo em circuitos fechados independentes de rios, especialmente em usinas de menor porte. Em ambos os casos, a configuração dos reservatórios depende das condições topográficas, aproveitando a geografia e a altitude das áreas para a construção.

É crucial identificar locais com características geográficas que permitam a criação de dois reservatórios verticais, separados por várias dezenas ou centenas de metros, mas relativamente próximos horizontalmente. Muitas vezes, depressões naturais do

terreno são aproveitadas para esse fim. Por isso, geólogos desempenham um papel fundamental no cálculo do potencial energético e dos custos associados à implementação de novas UHR. Além disso, a engenharia envolvida na construção do conduto de bombeamento deve ser cuidadosamente projetada para minimizar as perdas de energia.

A implementação de um projeto de UHR pode ser simplificada com a instalação de uma única unidade geradora (turbina + gerador) separada de uma unidade de bombeamento (motor + bomba), escolhendo a configuração mais adequada para cada uma. No entanto, a diversidade de equipamentos torna essa abordagem mais cara, e, por isso, raramente é adotada. Para quedas inferiores a 600 metros, geralmente são usadas turbinas reversíveis que podem operar tanto como turbinas quanto como bombas, resultando em vantagens econômicas.

Os impactos ambientais gerados por uma UHR são, em muitos aspectos, semelhantes aos de uma usina hidrelétrica convencional, como alteração da vazão, alargamento do leito do rio, elevação do nível do lençol freático, mudanças climáticas, e impactos na flora e fauna, além de repercussões sociais e econômicas. Contudo, como a maioria desses efeitos é local, é possível implementar ações mitigadoras ou compensatórias para reduzir os impactos negativos, que frequentemente são superados pelos benefícios gerados.

Embora a primeira turbina reversível do mundo tenha sido instalada na Usina Elevatória de Pedreira, inaugurada em 1939 no Estado de São Paulo, esse tipo de empreendimento ainda não é comum no Brasil. A maior parte das usinas hidrelétricas reversíveis está localizada em países altamente industrializados, como Estados Unidos, Japão, Alemanha, Espanha, China, Itália, Noruega e França.

Nos anos 1970 e 1980, foram realizados estudos de inventário de UHR no Brasil, identificando um grande potencial, especialmente na Região Sudeste. Em 2019, a Empresa de Pesquisa Energética, ligada ao Ministério de Minas e Energia, publicou uma nota técnica propondo metodologias para a escolha de locais para projetos de UHRs, considerando-os alternativas renováveis para a próxima década, conforme iremos detalhar a seguir.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentada a evolução histórica das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) no âmbito mundial e nacional, destacando diversas estratégias e motivações que as tornam fundamentais para garantir a segurança e a qualidade do fornecimento de energia elétrica durante a transição energética.

2.1 Evolução Histórica das UHR

2.1.1 As UHR no Mundo

De acordo com dados do Sandia National Laboratory e da International Hydropower Association (IHA) (2020, p. 13), a capacidade instalada total de usinas hidrelétricas reversíveis (UHR) no mundo atinge aproximadamente 160 GW, o que representa mais de 95% da capacidade total de todas as tecnologias de armazenamento existentes. Destaca-se que dez países concentram 77% da capacidade global de UHR, conforme ilustrado nas Figuras 2 e 3.

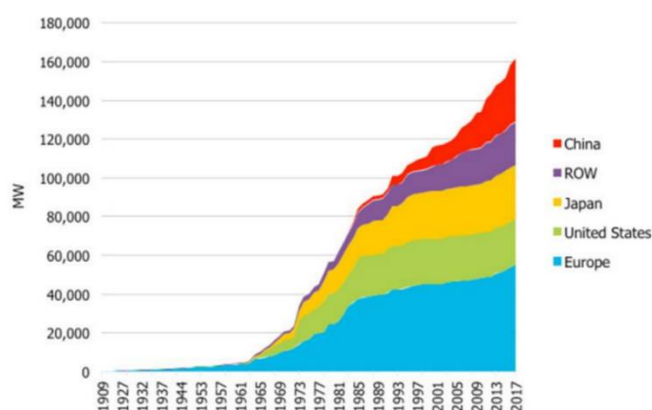


Figura 2 - Evolução da capacidade instalada de UHR no mundo (Fonte: IHA 2018)



Figura 3 - Distribuição da capacidade instalada de UHR no mundo em 2019 (Fonte: IHA 2020 adaptado)

O desenvolvimento e a implantação das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) em diferentes mercados ocorreram sob diversas estratégias e motivações, refletindo dinâmicas que envolvem a atratividade técnica e econômica em comparação com outras alternativas, bem como as necessidades específicas de cada sistema. Fatores como a matriz elétrica, o comportamento da carga, a disponibilidade e a variabilidade de recursos energéticos, além da capacidade de transmissão, desempenham um papel crucial nesse contexto.

Embora as primeiras UHR tenham sido instaladas entre as décadas de 1890 e 1900, seu crescimento mais significativo se deu a partir da década de 1970, impulsionado pela crise do petróleo. Esse cenário levou países como Japão, Estados Unidos e França a investirem na geração nuclear, como forma de aumentar a resiliência de seus setores elétricos frente às oscilações nos preços dos combustíveis fósseis. Assim, a geração nuclear, juntamente com outras fontes inflexíveis, como as termelétricas a carvão, favoreceu a implantação das UHR, que passaram a desempenhar um papel crucial no atendimento à demanda de ponta e na realização de serviços ancilares, como controle de frequência e autorrestabelecimento.

Com o esforço global para descarbonizar a matriz elétrica a partir da década de 2000, compromissos internacionais foram firmados com metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Políticas e incentivos para o desenvolvimento de fontes renováveis, aliados a uma significativa redução de custos, impulsionaram a inserção de energia eólica e fotovoltaica na matriz elétrica. Essa introdução de fontes caracterizadas por elevada variabilidade a curto prazo e limitada previsibilidade de

recursos primários redefiniu o papel e a operação das UHR existentes, que se tornaram essenciais para garantir a segurança e a qualidade do fornecimento de energia elétrica durante a transição energética.

Esse contexto renovou o interesse mundial na implantação de novas usinas reversíveis e no desenvolvimento de tecnologias de armazenamento, justificando diversos estudos sobre potencial e viabilidade técnica-econômica, como os realizados por Gimeno-Gutiérrez e Lacal-Aránzaga (2013) e ANU (2019).

Nos Estados Unidos, a partir de 2005, o avanço das técnicas de exploração e produção de “shale gas” especialmente a perfuração horizontal e o fraturamento hidráulico resultou em um aumento rápido da produção de gás e na diminuição dos preços. Isso favoreceu a instalação de termelétricas a gás, reduzindo parcialmente a atratividade das novas UHR como fonte de flexibilidade. Apesar da diminuição de novas UHR no país, muitas das usinas existentes passaram por repotenciação, permitindo o aumento da potência instalada e a melhoria das características operacionais, como observado nas usinas de Bath County, Blenheim Gilboa, Castaic, Cabin Creek, Jocassee, Ludington e Northfield Mountain, entre outras.

Na China, a implantação das UHR se intensificou após as reformas e o crescimento econômico a partir da década de 2000. Conforme destacado por Ming et al. (2013), a concentração de recursos energéticos renováveis em regiões distantes dos centros de consumo trouxe desafios técnicos e econômicos para a expansão e operação da rede de transmissão, criando necessidades que se alinham às capacidades e características das UHR.

2.2 As UHR no Brasil

A eletricidade no Brasil, a partir do final do século XIX, foi caracterizado por sistemas isolados operando sob regimes regulatórios incipientes e locais. O uso predominante era para iluminação, transporte coletivo e unidades industriais. Em meio a debates sobre tarifas de energia elétrica e lucros das concessionárias, foi promulgado o Código das Águas em 1934 (Decreto n. 24.643/1934), regulando a propriedade e uso das águas, além das concessões para exploração dos serviços de energia elétrica,

incluindo a determinação das tarifas desse serviço público.

Com o desenvolvimento industrial brasileiro a partir de 1930, especialmente no eixo Rio-São Paulo, a energia elétrica começou a ser vista como um fator limitante para o crescimento econômico, incentivando ampliações nas usinas existentes. Nesse cenário, foram construídas as primeiras usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, com investimentos de empresas privadas concessionárias de energia elétrica regional.

Ao longo dos anos, o arcabouço regulatório e a estrutura de mercado passaram por diversas mudanças, assim como as características físicas do sistema, como a rede de transmissão. O desenvolvimento e a participação das usinas hidrelétricas na matriz, muitas com reservatórios de regularização, permitiram atender às necessidades do sistema e adiar o uso de tecnologias específicas de armazenamento, como as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR). Ao todo, foram instaladas quatro UHR no Brasil, sendo três em São Paulo: Pedreira, Traição e Edgard de Souza, comissionadas em 1939, 1940 e 1955, respectivamente, e a UHR Vigário no Rio de Janeiro, comissionada em 1952. Destas, uma usina foi desativada (Edgard de Souza) e as demais não operam normalmente como usinas reversíveis devido a restrições operacionais descritas posteriormente.

As usinas Pedreira (100MW) e Traição (22MW) fazem parte do complexo Henry Borden em São Paulo, com a principal finalidade de bombear água do rio Pinheiros para o reservatório Billings, permitindo a produção de energia na usina hidrelétrica de Henry Borden (em Cubatão) com uma queda maior, Figura 4. No entanto, desde 1992, para preservar a qualidade da água destinada ao abastecimento da região metropolitana de São Paulo, o bombeamento do rio Pinheiros para o reservatório Billings só é permitido para controle de cheias, conforme determinações estabelecidas em normativos (Resolução Conjunta SMA/SES 03/92, de 04/10/1992, atualizada pela Resolução SMA-SSE-02, de 19/02/2010).

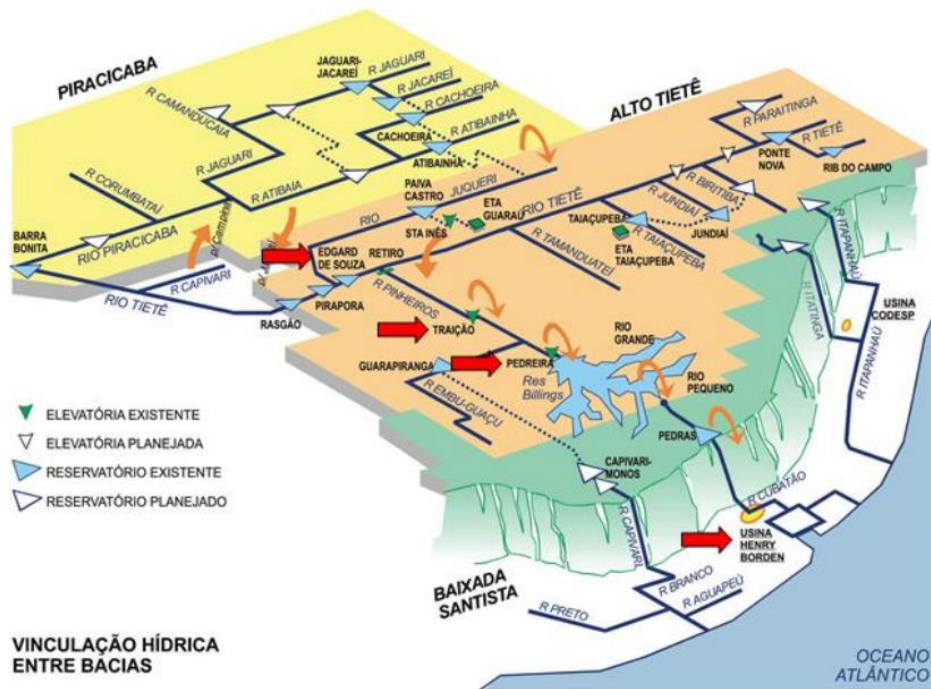


Figura 4 - Representação do complexo Henry Borden no estado de São Paulo (Fonte: DAEE/SP, 2020)

A usina Edgard de Souza foi construída em 1902 como uma hidrelétrica convencional e teve sucessivas ampliações até atingir a potência de 16MW em 1916. Em 1955 foi transformada em uma estação de bombeamento, incluindo a instalação de uma unidade reversível (14MW), sendo desativada em 1984. As estruturas da antiga usina foram modificadas tendo como função atual aumentar a capacidade de escoamento do rio Tietê.

A usina de Vigário (88MW) integra o complexo Lajes, no estado do Rio de Janeiro, conforme ilustra Figura 5 e embora possua unidades reversíveis, sua função principal é bombear a água do rio Paraíba do Sul para o reservatório de Vigário, permitindo a geração na usina de Nilo Peçanha.

A operação do complexo de Lajes é também restringida devido ao uso da água para abastecimento à cidade do Rio de Janeiro.



Figura 5 - Representação do complexo de Lajes no estado do Rio de Janeiro (Fonte: Light, 2020)

Com a evolução do sistema elétrico e as mudanças na matriz de geração observada nos últimos anos, o sistema poderá necessitar futuramente de recursos compatíveis com os atributos das UHR, como aqueles relacionados à flexibilidade.

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE2030) aponta que para os próximos 10 anos haverá um crescimento superior a 30% para as fontes eólica e fotovoltaica, com a estagnação das UHE, como mostra a Figura 6, reforçando a transformação da matriz elétrica brasileira nos próximos anos. E no recém publicado, o (PDE2034) aponta na modalidade de geração distribuída poderá haver um incremento que pode variar entre 16,9 GW a até 40 GW em apenas 10 anos, reforçando a necessidade de adoção de baterias e hibridização das fontes renováveis.

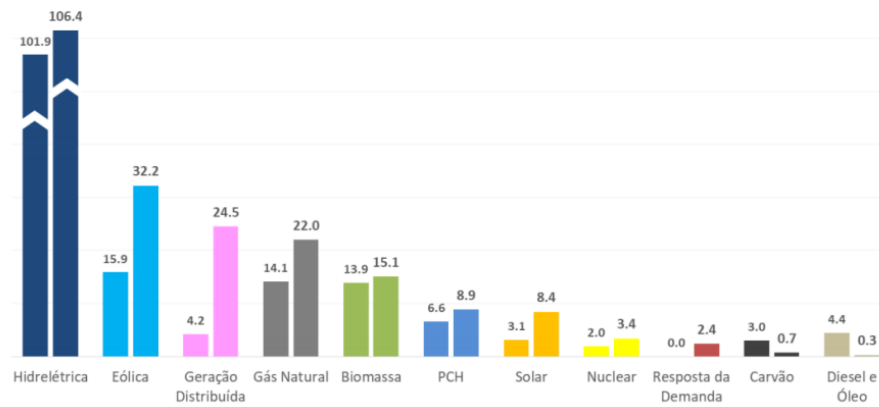


Figura 6 - Projeção da capacidade instalada para o horizonte decenal. Valores em GW (Fonte: PDE 2030)

3 PRODUTOS E APLICAÇÕES OFERECIDOS PELA UHR

A operação dos sistemas elétricos exige um constante equilíbrio entre a produção e o consumo de energia para manter a frequência da rede dentro dos limites estabelecidos. Esse equilíbrio enfrenta desafios de várias escalas temporais, como falhas em unidades geradoras ou em linhas de transmissão, a variabilidade de fontes de geração não controláveis e as flutuações da demanda.

A complexidade do processo é aumentada por diversas restrições operativas, incluindo a capacidade das linhas de transmissão e as potências máximas e mínimas das unidades geradoras, além das rampas para carga. Isso demanda recursos e serviços focados na segurança, qualidade e estabilidade do sistema interligado.

As Unidades de Armazenamento de Energia Hidráulica (UHR) possuem uma ampla gama de aplicações devido à sua capacidade de armazenamento e flexibilidade operacional, beneficiando a geração, transmissão e distribuição, além de usos fora do setor elétrico. Apesar disso, muitos dos benefícios das tecnologias de armazenamento não são adequadamente valorizados pelos mecanismos de mercado atuais, sendo muitas dessas aplicações consideradas serviços ancilares no Brasil.

Por fim, a diversidade de conceitos, arranjos e tecnologias das UHR resulta em diferentes tipos de aplicações, adaptadas às necessidades específicas de cada sistema e às melhores relações de custo-benefício.

3.1 Nivelamento de carga (arbitragem de energia)

Segundo o capítulo de nivelamento de carga, conforme indicado na Nota Técnica sobre sistemas de armazenamento em Baterias (EPE-DEE-NT-098-2019), refere-se à prática de consumir energia durante períodos de abundância para armazenamento e produzir energia em momentos de escassez. Esse processo resulta no nivelamento da curva de carga, permitindo uma operação mais eficiente do sistema, conforme esquemático da Figura 7.

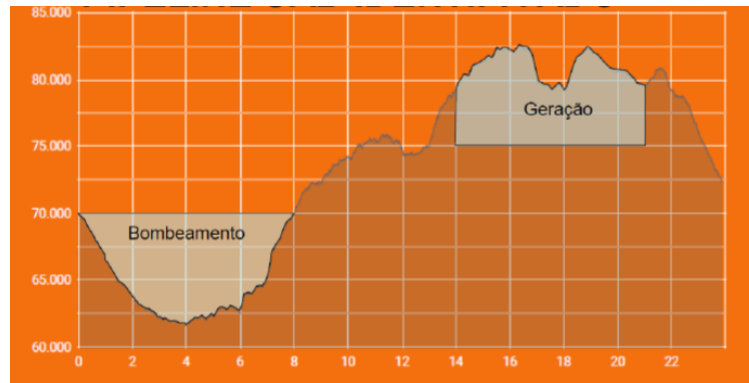


Figura 7- Exemplo de nivelamento de da curva de carga

Historicamente, o nivelamento de carga tinha como objetivo compatibilizar a variabilidade da demanda com a geração de fontes inflexíveis. Com o aumento da penetração de fontes renováveis, essa variabilidade também passou a afetar a geração, tornando-a menos previsível. A variabilidade dos preços captura esses fatores, sinalizando momentos de escassez ou abundância e orientando a produção ou consumo de energia pelos ativos.

As Unidades de Armazenamento de Energia Hidráulica (UHR) podem desempenhar um papel importante ao deslocar a geração de ponta, tradicionalmente realizada por tecnologias baseadas em combustíveis fósseis, resultando em economias de combustível e custos. O custo evitado de investimento e operação em tecnologias alternativas, como termelétricas a gás, é um benefício econômico significativo das UHR. Além disso, as UHR têm uma vida útil muito maior em comparação com as termelétricas a gás.

Entretanto, a capacidade das UHR de atender a demanda de ponta depende da duração dessa demanda, do tamanho do reservatório e da disponibilidade de energia para bombeamento fora dos períodos de pico. O armazenamento também pode melhorar o aproveitamento de recursos renováveis, como hidrelétricas a fio d'água, eólicas e fotovoltaicas, reduzindo vertimentos devido ao excesso de oferta.

É importante notar que, devido às perdas inerentes ao processo de bombeamento e geração, as UHR consomem mais energia do que produzem. Portanto, a diferença de preços entre os momentos de geração e bombeamento precisa ser suficientemente grande para garantir a viabilidade econômica da operação. O rendimento do ciclo, que

é a relação entre a energia produzida e consumida, varia entre 75% e 80% nos projetos.

O ciclo de geração e bombeamento pode ocorrer em diferentes frequências (diária, semanal, mensal, sazonal, plurianual ou estocástica), dependendo das características do sistema e da variação de preços no mercado de energia. A previsão dos benefícios da arbitragem de energia no horizonte de operação das UHR é desafiadora, dada a incerteza de diversos fatores que influenciam os preços da energia, como mudanças na matriz elétrica, disponibilidade de recursos naturais, preços de combustíveis, restrições de transmissão e comportamento da demanda. No capítulo regulatório iremos destacar em mais detalhes essas necessidades para melhor aferir os benefícios.

3.2 Provedimento de inércia

A inércia do sistema é uma importante característica para atenuar e retardar o desvio de frequência devido a desequilíbrios entre geração e consumo, em ocorrências operacionais observadas na escala de segundos, como ilustra a Figura 8.

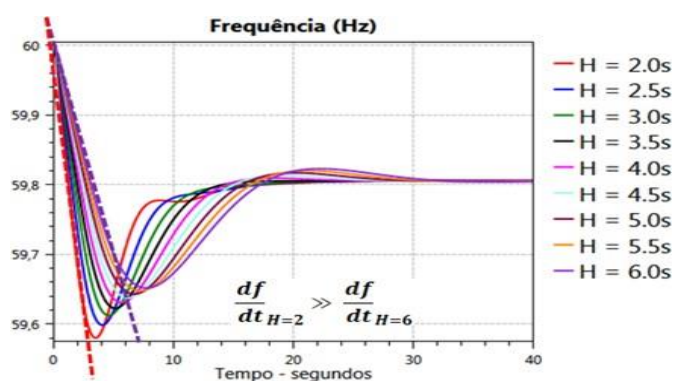


Figura 8 - Desvios de frequência para diferentes constantes de inércia (H)

Nas UHR, em unidades reversíveis de rotação fixa ou grupos ternários, a resposta inercial é direta devido a energia cinética armazenada nas partes rotativas dos equipamentos enquanto as unidades com rotação variável podem fornecer resposta inercial por meio de conversores eletrônicos de potência (inércia sintética).

3.3 Reserva de potência para controle de frequência

As Unidades de Armazenamento de Energia Hidráulica (UHR) desempenham um papel crucial na preservação da frequência da rede elétrica, especialmente após desequilíbrios entre a carga prevista e a geração programada. Elas podem injetar ou absorver potência no sistema, e sua capacidade de operar tanto em modo de bombeamento quanto em modo de geração proporciona uma reserva de potência maior em comparação às Usinas Hidrelétricas (UHE) convencionais.

Os diferentes tipos e tecnologias das unidades reversíveis, como unidades de rotação fixa, rotação variável e grupos ternários, influenciam tanto o tamanho da reserva de potência quanto o tempo de resposta.

- **Unidades de rotação fixa:** Estas não permitem o controle da potência absorvida durante o bombeamento, limitando a capacidade de controlar a frequência nesse modo de operação.
- **Unidades de rotação variável:** Essas unidades oferecem a flexibilidade de controlar a potência absorvida durante o bombeamento, melhorando assim o ajuste da frequência.
- **Grupos ternários:** Esses sistemas não apenas controlam a potência no modo de bombeamento, mas também permitem uma rápida conversão entre os modos de geração e bombeamento. Isso melhora a capacidade de fornecer reserva operativa (tanto positiva quanto negativa) para o sistema, embora geralmente envolva um custo de investimento mais elevado.

Essas características tornam as UHR uma ferramenta valiosa para a estabilidade e eficiência do sistema elétrico, especialmente em ambientes com alta penetração de fontes renováveis, que podem introduzir variabilidades significativas na geração e demanda de energia.

3.4 Acompanhamento de carga

As restrições técnicas de cada tecnologia de geração, incluindo a velocidade de

partida, parada, tomada e retirada de carga, podem levar a uma operação do sistema que não está alinhada com o menor custo possível, mesmo que isso ocorra apenas de forma temporária. Ao empregar tecnologias com tempos de rampa mais lentos para atender à demanda elevada, pode ser necessário iniciar essas unidades geradoras com antecedência, resultando em operação menos eficiente até que atinjam sua potência nominal.

As Unidades de Armazenamento de Energia Hidráulica (UHR) oferecem flexibilidade que pode tornar a operação do sistema mais econômica, dependendo das características específicas de cada sistema. Isso é especialmente relevante em sistemas com alta variabilidade na demanda e na geração.

Os tempos de partida e a transição entre modos de funcionamento variam entre as UHR, influenciados pela tecnologia das unidades reversíveis, pelo circuito hidráulico e pela concepção da usina. De acordo com Perez-Dias et al. (2014, p.31), os tempos observados são:

- **Partida com a máquina parada até geração plena carga:** entre 65 e 90 segundos.
- **Partida com a máquina parada até bombeamento a plena carga:** entre 80 e 340 segundos.
- **Transição entre modos de funcionamento (bomba para turbina e turbina para bomba):** entre 25 e 470 segundos.

Esses tempos destacam a importância da escolha da tecnologia adequada para otimizar a resposta do sistema às variações de demanda e garantir uma operação eficiente.

Cabe destacar que estas unidades adicionam inércia ao sistema, quando estão em funcionamento no modo de geração, bombeamento ou como compensador síncrono em caso de falhas de unidades geradoras, linhas de transmissão ou comportamento inesperado da demanda líquida.

3.5 Redução de ciclos de unidades termelétricas

Segundo EPRI (1990) e Ramirez (2016, p.21), a flexibilidade acrescentada pelas UHR em alguns sistemas, pode permitir a redução de ciclos de partida, parada e rampas de unidades termelétricas, com a conseqüente redução dos custos associados, como o desgaste de equipamentos, manutenção e perda de desempenho.

3.5.1 Redução da carga mínima do sistema e suporte à expansão da geração inflexível

Em sistemas com uma alta quantidade de unidades inflexíveis, a soma das capacidades mínimas operativas das unidades geradoras pode ultrapassar a demanda, resultando em problemas de estabilidade durante períodos de baixo consumo. Nesses casos, o uso de energia para bombeamento pelas Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) pode contribuir para a manutenção da estabilidade do sistema.

Assim, as UHR desempenham um papel crucial na expansão da geração inflexível, atendendo tanto a objetivos econômicos quanto estratégicos, ao fornecer a flexibilidade necessária. Vale ressaltar que a inflexibilidade, ou o "prêmio" da flexibilidade, pode influenciar significativamente a expansão da geração, conforme abordado de maneira recorrente neste momento de transição energética e nos últimos Plano Decenal de Energia (PDE)

3.6 Controle de reativos (controle de tensão)

De forma similar às usinas hidrelétricas convencionais, as UHR podem realizar o controle de potência reativa na rede, auxiliando o controle de tensão em diferentes pontos da rede de transmissão.

Em algumas máquinas reversíveis, um sistema de ar comprimido para rebaixamento de nível no rotor é necessário para a partida no modo de bombeamento, permitindo também o uso das máquinas como compensadores síncronos, de forma similar a algumas usinas hidrelétricas convencionais que também prestam esse serviço.

Destaca-se, que as tensões nos barramentos são dependentes da geração e demanda local de potência reativa, e da topologia da rede, indicando o caráter locacional desse serviço.

Em alguns sistemas, esse serviço é realizado também por ativos da transmissão como compensadores síncronos e estáticos.

3.7 Autorrestabelecimento (black-start)

Devido ao baixo consumo dos sistemas auxiliares necessários à partida e à velocidade de partida e sincronização, as UHR tornam-se candidatas naturais a prestar o serviço de autorrestabelecimento em caso de falha, aumentando desta forma a confiabilidade do sistema.

Em alguns casos, esse tipo de aplicação pode impor a necessidade de reserva de parte do volume útil do reservatório superior para a garantia do serviço, o que pode ser conflitante aos outros usos e oportunidades de receita.

3.8 Redução do congestionamento, perdas elétricas e adiamento do investimento em novos ativos de transmissão

As Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) podem ser utilizadas para programar e despachar recursos no sistema, influenciando os fluxos de potência na rede. Isso ajuda a reduzir custos associados a limitações na capacidade de transmissão e perdas elétricas, possibilitando o adiamento de investimentos em novas linhas de transmissão.

A eficácia desse serviço depende da localização da UHR, pois o ponto de injeção e retirada de energia é crucial para o fluxo elétrico. Segundo a IHA (2018, p. 8), linhas de alta tensão conectam centros de consumo a fontes renováveis distantes, e a variabilidade na geração pode afetar a qualidade da energia e a estabilidade da rede. Nesse contexto, as UHR podem aumentar a eficiência da transmissão e mitigar riscos.

Na China, conforme Ming et al. (2013, p. 107), a interligação de grandes blocos de geração a centros de consumo levou à construção de UHR próximas às cargas,

melhorando a segurança do suprimento e atenuando os efeitos de falhas nas linhas de transmissão. Um exemplo disso ocorreu em 2016, quando a usina reversível de Kruonis ajudou a mitigar os impactos da falha na interconexão entre Suécia e Lituânia (IRENA, 2020).

3.9 Usos exógenos ao setor elétrico

Assim como as usinas hidrelétricas convencionais, algumas Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) têm reservatórios que atendem a diversas funções além da geração de energia elétrica. Esses usos incluem abastecimento de água para consumo humano, controle de cheias, irrigação, melhoria da navegação e atividades recreativas. Exemplos notáveis incluem os reservatórios das usinas reversíveis Hiwassee, New Waddell, Castaic, San Luis e Edward G. Hyatt, nos EUA.

A usina reversível de San Luis, na Califórnia, realiza o armazenamento de água durante períodos úmidos, com foco na irrigação. Outra UHR, a de Langenprozelten, na Alemanha, possui capacidade de 180 MW a 16,7 Hz, sendo utilizada exclusivamente para o sistema de tração elétrica de transporte.

3.10 Suporte à expansão da geração de energia com fontes renováveis e baixos níveis de emissões de gases de efeito estufa (GEE)

Conforme Ramirez (2016, p. 21), as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) podem contribuir para a redução de Gases de Efeito Estufa (GEE), tanto ao apoiar uma maior penetração de fontes renováveis quanto ao deslocar a geração termelétrica. Manter baixas emissões de GEE, enquanto se expande o parque gerador nacional, é um desafio que exige a intensificação e diversificação do uso de fontes renováveis para a eletricidade.

O aumento da geração de fontes renováveis intermitentes requer recursos que supram os serviços que elas não conseguem oferecer.

No Brasil, as hidrelétricas convencionais têm sido fundamentais para prover flexibilidade e armazenamento, mas a capacidade de regularização da geração tem diminuído devido à escassez de novos reservatórios. Nesse cenário, as UHR surgem

como uma solução eficiente e de baixo custo, permitindo o bombeamento e armazenamento de energia em períodos de baixa demanda para uso durante os picos de consumo. Isso proporciona maior confiabilidade e flexibilidade para o sistema elétrico.

De acordo com Canales et al. (2015), em muitos países, a reserva de energia e os serviços ancilares são frequentemente fornecidos por centrais térmicas de ciclo aberto movidas a gás natural. A implementação de UHR pode evitar o uso de combustíveis fósseis e reduzir as emissões de GEE associadas à geração térmica. Segundo Zuculin et al. (2014, apud Raimundo, 2019), as emissões de CO₂ das UHR são inferiores às das hidrelétricas tradicionais devido ao menor tamanho dos reservatórios e à possibilidade de utilizar estruturas já existentes.

É importante notar que as UHR são consumidoras líquidas de energia, ou seja, consomem em alguns casos mais energia para o bombeamento do que geram. Assim, o balanço total de emissões depende do sistema elétrico em que estão inseridas. Kougias (2017) indica que, assumindo uma eficiência de 75%, as UHR geram emissões correspondentes a 25% da média do portfólio de eletricidade, tornando-se uma tecnologia favorável para o balanceamento de carga.

Portanto, as UHR podem ajudar a mitigar as emissões de GEE no setor elétrico brasileiro, tanto diretamente, com sua produção de baixa emissão, quanto indiretamente, ao favorecer a integração de fontes renováveis intermitentes, como a eólica e a solar. Esses benefícios estão alinhados com os critérios para obtenção de títulos verdes (green bonds), abrindo oportunidades para esse tipo de financiamento.

4 DESAFIOS PARA A INSERÇÃO DE NOVAS UHR

Do ponto de vista construtivo, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) apresentam, de forma geral, desafios semelhantes aos das hidrelétricas convencionais, especialmente em questões técnicas e ambientais. No entanto, os desafios relacionados a questões regulatórias e de remuneração são mais específicos e dependem do desenho do mercado de energia elétrica.

Conforme Barbour (2016, p. 425), mais de 95% das UHR existentes foram planejadas, construídas e comissionadas em sistemas operados por empresas monopolistas e verticalizadas, predominantemente estatais. Nessa estrutura, os preços da energia são fixados para cobrir os custos dos ativos, com os investimentos sendo aprovados pelo regulador ou planejados pelo Estado (Perez-Arriaga, 2013, p. 132). Essa abordagem ajuda a mitigar os riscos associados à imprevisibilidade da receita futura para os empreendedores, garantindo a recuperação do investimento e criando um ambiente favorável para o financiamento de novas usinas.

A partir da década de 1990, com o possível esgotamento das fontes tradicionais de financiamento público e a onda de reestruturação dos mercados de energia elétrica que afetou diversos países, incluindo a desverticalização e privatização de várias companhias de energia, observou-se que os investimentos na expansão do sistema elétrico não foram substituídos de maneira equivalente pelo setor privado. Como resultado, houve um acentuado declínio na implementação de novas usinas hidrelétricas, incluindo as usinas reversíveis.

Esse declínio não ocorreu devido a uma alteração nos benefícios técnicos e econômicos que as usinas hidrelétricas oferecem, mas sim em função da preferência por financiamento privado em projetos de baixo risco, que não exigem capital intensivo, têm um tempo de construção mais curto e um retorno mais rápido, como é o caso das termelétricas a gás.

Assim, embora as UHR sejam consideradas atraentes do ponto de vista técnico e econômico, sua inserção em mercados liberalizados continua a ser um desafio

enfrentado por diversos países, conforme apontado por autores como Head (2000, p. ix), Barbour (2016), Ramirez (2016) e Sioshansi et al. (2012).

Para uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a inserção das UHR e os possíveis entraves descrevemos nos itens a seguir questões relacionadas à atratividade financeira, regulação e desenho de mercado para essas usinas.

4.1 Projetos de engenharia específicos para as condições locais

A concepção construtiva, os custos e as características das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) são fortemente influenciados por condições locais, como topografia, geologia, hidrologia, limitações operacionais e as necessidades do sistema elétrico no ponto de conexão. Essa diversidade resulta em diferentes soluções técnicas para um mesmo local, o que torna impossível a existência de projetos idênticos. Assim, há uma necessidade de estudos específicos para definir as características técnicas, os custos e os potenciais impactos socioambientais. Isso leva a uma maior complexidade e a um aumento nos esforços necessários para o desenvolvimento do projeto, licenciamento ambiental e obtenção de outorgas, especialmente quando comparado a outros tipos de empreendimentos, como termelétricas e sistemas de baterias.

É importante ressaltar que a qualidade dos estudos pode influenciar não apenas a viabilidade técnica e econômica do empreendimento, mas também os riscos associados à sua execução. Para algumas fontes e tecnologias, incentivos e políticas têm possibilitado, a médio e longo prazo, uma redução significativa nos custos de implantação. No entanto, devido à baixa padronização dos projetos tradicionais de UHR e à maturidade dessa tecnologia, esses mesmos incentivos podem não ter os mesmos efeitos sobre os custos de implantação.

4.2 Custos de implantação

As hidrelétricas, incluindo as UHR, têm grande parte do investimento associado às obras civis (tipicamente entre 60% e 70% do custo total de implantação), sendo que características locais, como as condições geológicas, topográficas e hidrológicas, podem influenciar significativamente o arranjo da usina, os custos associados e o

tempo de construção.

De acordo com o PDE 2034, o caderno Caderno de Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão apresentam detalhadamente as estimativas de custos das fontes de geração consideradas como oferta para a expansão de energia elétrica nos estudos do PDE, assim como os custos referenciais de expansão das interligações entre os subsistemas, conforme figuras 9 e 10.

Tipo de Oferta	Vida útil econômica (anos)	Faixas de CAPEX, mín e máx (R\$/kW)	CAPEX Referência, sem JDC (R\$/kW)	O&M (R\$/kW.ano)	Taxas, Encargos e Impostos (R\$/kW.ano)	Tempo médio de desembolso (meses)
Armazenamento - Baterias ⁵	20	5.000 a 9.500	6.000	100	270	12
			6.700	130	290	
Biomassa - Bagaço de Cana	20	2.000 a 6.500	3.500	100	140	24
			4.500	100	150	
Biomassa - Cavaco de Madeira	20	3.500 a 8.500	7.500	160	180	36
Biogás – Resíduo sucroenergético ⁶	20	3.000 a 12.000	10.000	600	230	24
RSU – Incineração ⁷	20	20.000 a 36.500	27.000	1.100	980	36
Carvão Nacional	25	8.000 a 16.000	13.000	260	790	48
Eólica Offshore	20	10.500 a 25.000	15.000	360	550	36
Eólica Onshore	20	4.000 a 7.500	4.300	110	150	24
			5.000	110	160	
			5.600	110	160	
			6.200	110	170	

⁵ Referência: Sistemas com baterias de íon lítio (BESS) para operação estimada de 3 horas.
⁶ Referência: Usinas com biodigestores de resíduos vegetais e motores de combustão interna.
⁷ Referência: Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos.

Figura 9 - Parâmetros Econômicos por tipo de fonte, PDE 2034

Tipo de Oferta	Vida útil econômica (anos)	Faixas de CAPEX, mín e máx (R\$/kW)	CAPEX Referência, sem JDC (R\$/kW)	O&M (R\$/kW.ano)	Taxas, Encargos e Impostos (R\$/kW.ano)	Tempo médio de desembolso (meses)
Solar Fotovoltaica	25	3.000 a 6.000	3.300	60	130	12
			3.800	60	140	
			4.300	60	140	
			5.000	60	150	
Fotovoltaica Flutuante	25	4.000 a 8.500	6.000	80	160	12
Gás Natural – Ciclo Combinado	20	3.500 a 7.000	4.800	710 ⁸	330	36
			6.400 ⁹	200 ⁹	320	
GNL – Ciclo Combinado	20	3.500 a 6.000	5.100 ¹⁰	200 ¹⁰	280	36
GNL - Ciclo Simples	20	3.000 a 5.000	4.500	200	250	24
Nuclear	30	20.000 a 40.000	30.000	650	730	60
PCH	30	5.000 a 13.500	7.000	60	140	30
			9.000	60	160	
			12.000	60	180	
Reversíveis	30	6.000 a 15.000	7.800	80	380	36

⁸ Referência: Modelo de negócio considera, no custo de O&M, além da usina termelétrica, os custos de transporte do gás (gasoduto).
⁹ Referência: Modelo de negócio considera, além da usina termelétrica, a parcela do CAPEX e do O&M do gasoduto de escoamento.
¹⁰ Referência: Modelo de negócio considera, além da usina termelétrica, parcela do CAPEX e do O&M do Terminal de Regaseificação destinada à usina (terminal próprio).

Figura 10 - Parâmetros Econômicos por tipo de fonte, PDE 2034

Ou seja, claramente a depender das condições técnicas, relevo, geológicas e ambientais as UHR podem ser mais atrativas que as usinas solares, eólicas e demais

sistemas de armazenamento – Baterias, conforme o CAPEX, OPEX e sua vida útil e sem considerar os demais benefícios de flexibilização e para os sistemas apontados nos itens anteriores.

O longo período de construção traz ainda incertezas associadas à inflação sobre os diversos custos incorridos durante a execução das obras, por isso a variação ser mais que o dobro do CAPEX.

Assim como as UHE, as UHR podem conter, a depender de sua concepção construtiva, obras subterrâneas significativas, acentuando a exposição do empreendimento aos riscos geológicos.

Embora um programa adequado de estudos e investigações de campo possa permitir a redução dos riscos e otimização do aproveitamento, algumas condições só podem ser conhecidas durante a execução das obras, expondo o projeto a maiores incertezas e desvios em relação ao planejamento quando comparados a outros tipos de empreendimentos.

Devido à natureza das obras e dos custos de implantação, as UHR são normalmente empreendimentos com economia de escala, o que significa uma tendência de maior atratividade econômica para projetos de grande porte. Como exemplo, na China, Japão e Estados Unidos, a soma das UHR com potência instalada superior a 500MW equivale respectivamente a 90%, 95% e 87% da potência instalada total de UHR em cada país.

O grande investimento inicial e o longo tempo de retorno de investimento pode demandar maior estabilidade dos fluxos de receita para que empreendimentos desse tipo sejam financeiramente atrativos, sendo que considerações de financiamento podem ter importante papel na atratividade econômica das UHR frente às outras tecnologias, como apresenta o trabalho de Discoll (2019).

Por outro lado, assim como as hidrelétricas convencionais, as UHR são empreendimentos de longa vida útil, cujas estruturas principais podem se estender por mais de 100 anos, conforme exemplo das hidrelétricas brasileiras que estão passando

por fase de modernização, sendo suas condições estruturais do barramento, canal de adução, tomada d'água e vertedouro estão sendo preservadas e sem a necessidade de intervenção com obras relevantes, apenas reparos.

4.3 Tempo de provisionamento

Considerando a complexidade do projeto e as necessidades intrínsecas relacionadas aos processos de licenciamento e outorga, a implantação de uma UHR pode demandar prazos relativamente longos para o desenvolvimento dos estudos e para a obtenção das aprovações junto aos órgãos licenciadores, como cerca de 6 anos a 8 anos, segundo EPRI (1990, p. 2-21), podendo variar em função das particularidades de cada UHR e conforme processos de licenciamento e outorga em cada país ou mercado.

A execução do projeto envolve a fabricação, o transporte e montagem de equipamentos de grande porte projetados e fabricados especificamente para a usina, além de expressivas obras civis, incluindo em muitos casos longas extensões de escavação subterrânea.

Tipicamente a construção dura cerca de 5 anos, EPRI (1990, p. 2-21), com possibilidade de variação devido aos riscos, porte e características das obras envolvidas, incluindo as condições geológicas locais.

4.4 Empreendimentos multipropósitos

Cabe ressaltar que potenciais podem ter usos além daqueles relacionados ao setor elétrico, como o de reserva de água para sistemas de irrigação e consumo humano, controle de cheias e navegação.

Apesar dos benefícios, em tais casos pode haver maior complexidade para a viabilização e implantação do empreendimento por agentes privados que atuam estritamente no mercado competitivo de energia elétrica, que devem internalizar o custo total das estruturas da UHR, mesmo sem a compensação econômica correspondente.

Por isso, a participação pública é comum no desenvolvimento e viabilização desses empreendimentos, tendo em vista o interesse público mais amplo, por meio de leilões específicos de energia.

4.5 Valoração de benefícios e imprevisibilidade de receita

Conforme Sioshansi et al. (2012, p. 3), uma das principais barreiras para o desenvolvimento de sistemas de armazenamento é a incapacidade dos modelos de mercado em valorizar e compensar os múltiplos benefícios que esses empreendimentos oferecem ao sistema interligado.

Diversas características do sistema podem influenciar o valor dos benefícios das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR), incluindo:

- Fontes e tecnologias presentes na matriz energética;
- Infraestrutura de linhas de transmissão;
- Disponibilidade e os preços de combustíveis como gás natural, carvão e óleo diesel;
- Disponibilidade de recursos naturais, como vento, radiação solar e hidrologia;
- Demanda, considerando as evoluções econômicas, tecnológicas e comportamentais, incluindo iniciativas relacionadas à eficiência energética, veículos elétricos e respostas à demanda.

A dependência dos benefícios em relação a essas características do sistema interligado pode impor aos investidores e desenvolvedores condições e riscos que estão além de sua capacidade de gestão e responsabilidade. Além disso, a valoração dos diferentes benefícios se torna ainda mais complexa e incerta em projeções de longo prazo.

Essa imprevisibilidade pode resultar em um risco econômico financeiro para os investidores, que, quando combinado com outras características e riscos mencionados anteriormente, diminui a atratividade das UHR em comparação a outros

projetos candidatos a investimento.

Adicionalmente, a forma de operação e a valoração de cada um dos serviços fornecidos pelas UHR podem influenciar significativamente a concepção construtiva e as características técnicas, como potência instalada e a quantidade e tipo de unidades reversíveis (rotação fixa, rotação variável, grupos ternários), com impactos nos custos, prazos de construção e desempenho.

Observa-se que a maior expansão das UHR ocorreu em mercados onde o modelo de remuneração e contratação permitiu remover integralmente ou parcialmente o risco do desenvolvedor, como nos modelos de custo por serviço (observados na China, Japão, Estados Unidos e França antes da reestruturação) ou por meio de mecanismos de capacidade.

Como muitos dos benefícios estão associados aos custos evitados e à escassez de armazenamento de energia no sistema, a inserção dessas e de outras tecnologias de armazenamento na matriz pode reduzir o valor de seus próprios benefícios. Assim, as receitas associadas às variações temporais e locais dos preços de energia podem se tornar incertas a longo prazo, dependendo da evolução e das condições do sistema.

4.6 Aspectos regulatórios do armazenamento

Os benefícios que as (UHR) podem oferecer ao sistema torna difícil classificá-las como ativos exclusivos de geração ou transmissão. Essa complexidade complica sua inserção nos marcos regulatórios existentes, que, após a desverticalização das empresas de energia, visaram separar os ambientes competitivo (geração) e regulado (transmissão) para evitar distorções na concorrência.

Assim, a forma como os custos de investimento são recuperados passa a depender da maneira como as UHR são classificadas do ponto de vista regulatório, como ativos de geração (investimento recuperado no mercado competitivo) ou de transmissão (investimento recuperado pelo modelo de custo por serviço ou receita permitida).

Deve-se destacar que em muitos mercados competitivos o sinal de preço dificilmente abrange todos os benefícios que as UHR podem fornecer ao sistema, e desta forma, se o investimento é recuperado nesse ambiente, o dimensionamento e concepção construtiva da UHR será dedicado a maximizar somente os atributos valorados. Uma opção, segundo Sioshansi et al. (2012, p.9) seria a utilização de modelos de livre acesso de forma similar ao realizado nos Estados Unidos pela FERC order nº636 para o gás natural. Nesse modelo, conforme o autor, a UHR ou o sistema de armazenamento poderia vender sua capacidade a terceiros por meio de leilões coordenados como exemplo pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, conforme estudos da EPE- Empresa de Planejamento e Pesquisa Energéticas e o Operador Nacional do Sistema Elétrico- ONS. Dessa forma, o investimento da UHR seria recuperado por receitas do ambiente competitivo e receitas do ambiente regulado, a depender do uso de cada agente.

Em 2021, por meio de contribuição à Consulta Pública nº 108/2021 – Diretrizes para o Leilão de Reserva de Capacidade, ficou evidente a importância da conclusão do processo regulatório sobre armazenamento de energia elétrica, previsto para meados de 2022 pela ANEEL, para permitir a participação dessas tecnologias em futuros leilões de capacidade. Apontando a rápida conclusão desse processo trará benefícios significativos, como maior competição, segurança e modicidade tarifária, além de vantagens ambientais por não depender de combustíveis fósseis.

Recentemente, em 27/09/2024, o MME (Ministério de Minas e Energia) abriu a Consulta Pública nº 176/2024, que apresenta para discussão com a sociedade a minuta preliminar da Portaria de Diretrizes para o Leilão de Reserva de Capacidade na forma de Potência, com sistemas de armazenamento, previsto para junho de 2025.

O prazo para as contribuições foi até dia 28 de outubro de 2024. De acordo com o Ministério, a principal inovação deste leilão é a contratação de sistemas de armazenamento por meio de baterias.

Nos últimos dias tem se destacado nas discussões de planejamento do setor elétrico, devido à sua capacidade de resposta instantânea e à flexibilidade operativa e locacional que oferecem, cuja finalidade do leilão de baterias é impulsionar a

tecnologia no Brasil, para que possa contribuir para um sistema elétrico mais confiável, resiliente, acessível e competitivo.

4.7 Outorga para exploração de aproveitamentos hidrelétrico

No Brasil, a Constituição da República Federativa de 1988 estabelece, no artigo 20º, que os potenciais de energia hidráulica são bens da União. O artigo 21º atribui à União a responsabilidade pela exploração desses potenciais, seja de forma direta ou por meio de autorização, concessão ou permissão, em articulação com os Estados onde estão localizados os recursos hidroenergéticos. A Lei nº 9.074/1995 define quais aproveitamentos de potenciais hidráulicos são sujeitos a concessão, autorização ou permissão, conforme a potência do aproveitamento, especificando, no artigo 5º, aqueles que devem ser concedidos mediante licitação.

Esse mesmo artigo determina que nenhum aproveitamento hidrelétrico pode ser licitado sem a definição do "aproveitamento ótimo" pelo poder concedente. O "aproveitamento ótimo" é compreendido como o potencial identificado em sua concepção global, levando em conta o melhor eixo de barramento, o arranjo físico geral, os níveis d'água operativos, o reservatório e a potência, todos componentes da alternativa escolhida para a divisão das quedas de uma bacia hidrográfica nos Estudos de Inventário Hidrelétrico da Bacia.

Os procedimentos de outorga são detalhados em normativos estabelecidos pela ANEEL, que incluem diretrizes para os estudos de inventário hidrelétrico de bacias e para a viabilidade técnica e econômica de usinas hidrelétricas (UHE). No entanto, não há menções específicas sobre usinas hidrelétricas reversíveis (UHR).

Conforme mencionado anteriormente, as UHR podem ter diferentes concepções construtivas, com reservatórios que podem ser criados dentro ou fora de cursos d'água, reutilizando reservatórios existentes ou integrando-se a uma cascata de empreendimentos hidrelétricos convencionais. Além disso, o potencial de geração pode ser totalmente ou parcialmente gerado pela ação de bombeamento.

Quando se utiliza reservatórios de hidrelétricas já existentes para implantar UHR, é

crucial desenvolver regulamentos que abordem possíveis conflitos relacionados a diferentes usos por cada agente. Isso inclui avaliar os impactos sobre os aproveitamentos a jusante da cascata e a distribuição dos benefícios.

Assim, conclui-se que os normativos relacionados à outorga de aproveitamentos hidrelétricos no Brasil ainda não contemplam adequadamente as usinas hidrelétricas reversíveis.

Como exemplo, ao fornecer capacidade ao sistema, as UHR se configuram como ativos de geração. Por outro lado, ao possibilitar o adiamento do investimento em novas linhas de transmissão (aumentando a margem de escoamento), as UHR se comparam a ativos de transmissão. Se o investimento é recuperado por meio de um ambiente regulado ("rate based"), a participação da UHR no mercado de geração pode ser proibida ou limitada devido a potenciais distorções competitivas. A forma de operação ou despacho que maximiza os benefícios do adiamento da linha de transmissão pode diferir daquela que maximiza os benefícios da capacidade, gerando interesses conflitantes entre os dois ambientes.

4.8 Licenciamento ambiental

O licenciamento ambiental de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras é um dos principais instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente, conforme estabelecido pela Lei Federal nº 6.938/1981 e pela Lei Complementar nº 140/2011. A construção de usinas hidrelétricas se enquadra entre essas atividades, de acordo com a Resolução CONAMA nº 001/1986. Esta Resolução estabelece a obrigatoriedade da elaboração de um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para obras hidráulicas voltadas à exploração de recursos hídricos, como barragens hidrelétricas, que tenham capacidade superior a 10 MW, bem como para usinas de geração de eletricidade de qualquer fonte que também ultrapasse essa potência.

No Brasil, devido ao histórico de implantação de empreendimentos hidrelétricos, já se acumula uma vasta experiência na elaboração de Estudos de Impacto Ambiental para projetos dessa natureza. No entanto, embora se presuma que os impactos

socioambientais decorrentes de uma Usina Hidrelétrica Reversível (UHR) sejam semelhantes aos de uma hidrelétrica convencional, essa tipologia de projeto ainda é relativamente nova e pouco utilizada no país.

É importante destacar que os impactos socioambientais das UHR variam conforme as condições locais, o porte do projeto e suas características construtivas. Fatores como o tamanho dos reservatórios, a extensão das escavações e a necessidade de construção de barramentos em cursos d'água influenciam significativamente esses impactos, além da forma de operação da usina.

Usinas reversíveis de circuito aberto (open loop), nas quais pelo menos um dos dois reservatórios (superior e inferior) é formado a partir do barramento de um rio, apresentam impactos ambientais muito semelhantes aos de uma Usina Hidrelétrica (UHE) tradicional, ou, dependendo da escala, a uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH).

Por outro lado, estudos recentes sugerem que projetos de usinas reversíveis de circuito fechado (closed loop) tendem a provocar impactos menos significativos nos ecossistemas, tanto em termos de abrangência quanto de duração, em comparação às UHR de circuito aberto. Esses projetos se caracterizam pela implantação de ambos os reservatórios fora do fluxo d'água, o que geralmente oferece maior flexibilidade em sua localização.

Da mesma forma, espera-se que projetos de UHR que utilizem reservatórios já existentes estejam associados a impactos menos pronunciados, uma vez que evitam aqueles decorrentes do barramento de rios e da formação de novos reservatórios. Contudo, é crucial ressaltar que a implantação de uma UHR pode demandar obras subterrâneas significativas, que podem causar diversos impactos devido às escavações e à remoção e disposição do material.

Dado que não existem precedentes de processos de licenciamento ambiental para usinas reversíveis no Brasil, é fundamental avançar na discussão sobre esses empreendimentos. Essa discussão deve envolver órgãos licenciadores e reguladores, desenvolvedores de projetos e outras partes interessadas, buscando compreender

melhor as diversas concepções de projetos, seus impactos, e as medidas para reduzir, mitigar e compensar esses efeitos. Além disso, é necessário avaliar até que ponto a legislação brasileira relativa ao licenciamento ambiental precisa ser adaptada para incluir usinas reversíveis.

Com esse aprofundamento, será possível compreender melhor as especificidades das UHR e avaliar a abordagem mais adequada para o planejamento e licenciamento ambiental desses empreendimentos.

4.9 Outorga pelo direito de uso dos recursos hídricos

Além dos aspectos estritamente relacionados à energia, a implementação de usinas hidrelétricas reversíveis (UHR) pode trazer benefícios significativos para outros usos da água. Isso se dá tanto pelo armazenamento do recurso quanto pela regularização do regime hidrológico, criando condições favoráveis para a navegação, por exemplo. Entre os diversos usos da água, destacam-se o abastecimento urbano, a irrigação, o controle de cheias e as atividades de lazer. Canales et al. (2015) mencionam os casos dos empreendimentos Olivenhain-Hodges e do Lago Elsinore, nos Estados Unidos, onde as UHR foram projetadas para múltiplos usos da água, resultando em impactos positivos tanto local quanto regionalmente.

Entretanto, a conciliação de diferentes usos torna-se complexa, pois envolve diversos atores com interesses, muitas vezes, conflitantes. No caso das UHR, é crucial avaliar se essa compatibilização resulta em uma redução da capacidade operativa admissível. Um exemplo é a UHR Foz Tua, em Portugal, que, em determinados períodos, interrompe sua operação para permitir a passagem de embarcações turísticas no rio Douro. O processo de turbinamento ou bombeamento da água pode gerar ondas que representam riscos para a navegação. Outro caso é a usina elevatória de Pedreira, em São Paulo, onde o bombeamento da água do rio Pinheiros para o Reservatório Billings é limitado para não comprometer a qualidade da água destinada ao abastecimento público, o que acaba diminuindo a capacidade de geração da usina hidrelétrica Henry Borden.

A complexidade desse cenário aumenta à medida que os projetos de UHR são

instalados em áreas onde a água é um recurso escasso e já existem conflitos por seu uso, especialmente em regiões próximas a grandes centros urbanos.

Nesse contexto, a Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelecida pela Lei Federal n. 9.433/1997 (conhecida como Lei das Águas), fundamenta que a gestão dos recursos hídricos deve sempre promover o uso múltiplo das águas. Assim, é fundamental avaliar os benefícios e implicações da implantação de usinas reversíveis, tanto em termos de quantidade quanto de qualidade da água.

Essa discussão deve ser abordada em cada projeto, no âmbito da outorga de direito de uso dos recursos hídricos, necessária para aproveitar os potenciais hidrelétricos, conforme estipulado na Lei das Águas. Nesse momento, será preciso considerar: os usos da água na região do empreendimento; a interferência do projeto na quantidade e qualidade da água da bacia hidrográfica; a operação de cada UHR, que pode alternar rapidamente entre geração e bombeamento; e as possíveis restrições à sua operação.

De uma perspectiva mais ampla, é importante discutir em que medida os normativos atuais relacionados à outorga de recursos hídricos, estabelecidos pela Agência Nacional de Águas, tanto na esfera estadual, precisam ser revisados ou aprimorados para contemplar as usinas reversíveis em suas diversas concepções, incluindo projetos de circuito fechado ou a implantação em reservatórios já existentes.

5 POTENCIAL DE UHR NO BRASIL

Conforme apresentado no capítulo anterior, tendo em vista que as UHR constituem uma tecnologia que permite oferta de potência com a flexibilidade necessária para o atendimento à variação da carga no curto prazo, além de oferecer benefícios sistêmicos relacionados à economia, segurança e qualidade no fornecimento de energia elétrica (serviços ancilares), a sua participação na cesta de ofertas da matriz elétrica brasileira poderá constituir, num futuro próximo, um protagonista na transição energética garantir uma expansão do sistema elétrico de forma econômica e sustentável.

No entanto, no Brasil, faltam estudos atualizados e precisos que identifiquem os locais mais adequados para a implantação de UHR, incluindo a caracterização básica de funcionamento e custo de implantação. Portanto, é fundamental realizar Estudos de Inventário de UHR, considerando o estado da arte tecnológico, mercadológico e socioambiental. Vale destacar que o mapeamento e levantamento do potencial para UHR já foram realizados em diversos países, como Estados Unidos, Canadá, Noruega, Austrália e Europa.

Os Estudos de Inventário de UHR são a etapa inicial de uma série de estudos necessários que, além de apoiar o planejamento da expansão do sistema elétrico, podem auxiliar na definição de aspectos regulatórios específicos, atualmente inexistentes, para a inserção de usinas reversíveis no Sistema Interligado Nacional (SIN). Apesar da falta de regulamentação, o ciclo de implantação desses empreendimentos deve seguir uma sequência de estudos que permitam o melhor aproveitamento do potencial local, a sincronização com o planejamento do setor elétrico e a definição da melhor solução técnica, econômica e socioambiental, dada a complexidade e multidisciplinaridade associadas a projetos hidrelétricos.

Nesse contexto, alinhada às atribuições da EPE estabelecidas no Art. 3º da Lei 10.847/2004, a SEG/DEE/EPE, elaborou em 13/02/2019 a Metodologia e Resultados Preliminares para o estado de Rio de Janeiro, nº. EPE-DEE-NT-006/2019-R0 com a finalidade de mapear locais favoráveis para a implantação de UHR, selecionar os mais promissores e caracterizá-los quanto à energia armazenada e às obras/equipamentos

associados à potência instalada.

5.1 Resultados Preliminares do Estudo de Potencial no Rio de Janeiro-RJ

Utilizando a metodologia apresentada na nota técnica, foram identificados para o estado do Rio de Janeiro os locais com condições topográficas mais favoráveis à implantação de usinas reversíveis com a topologia indicada da figura 11.

A Figura 11 indica os locais identificados, classificando-os por faixa de desnível, incluindo os locais apontados no estudo da Eletrobrás de 1987 (indicados com triângulos da cor magenta), permitindo observar que muitos dos aproveitamentos identificados no estudo de 1987 localizam-se em áreas atualmente protegidas por lei.

A Figura 12 apresenta os locais com características favoráveis, fora de áreas legalmente protegidas e classificadas por desnível, enquanto a Figura 13 apresenta os mesmos locais classificados pela relação L/H, onde L refere-se a distância em planta entre os reservatórios e H o desnível topográfico entre os dois reservatórios.

Cabe ressaltar que projetos com quedas maiores, possibilitam maior capacidade de armazenamento e potência quando comparados a projetos com quedas menores e mesmo volume útil dos reservatórios. Além disso, circuitos hidráulicos mais curtos podem ser associados a custos mais baixos de implantação da UHR e menores perdas hidráulicas. Desta forma, o desnível topográfico (H) e a relação L/H são parâmetros que indicam uma tendência de atratividade técnica e econômica dos aproveitamentos.

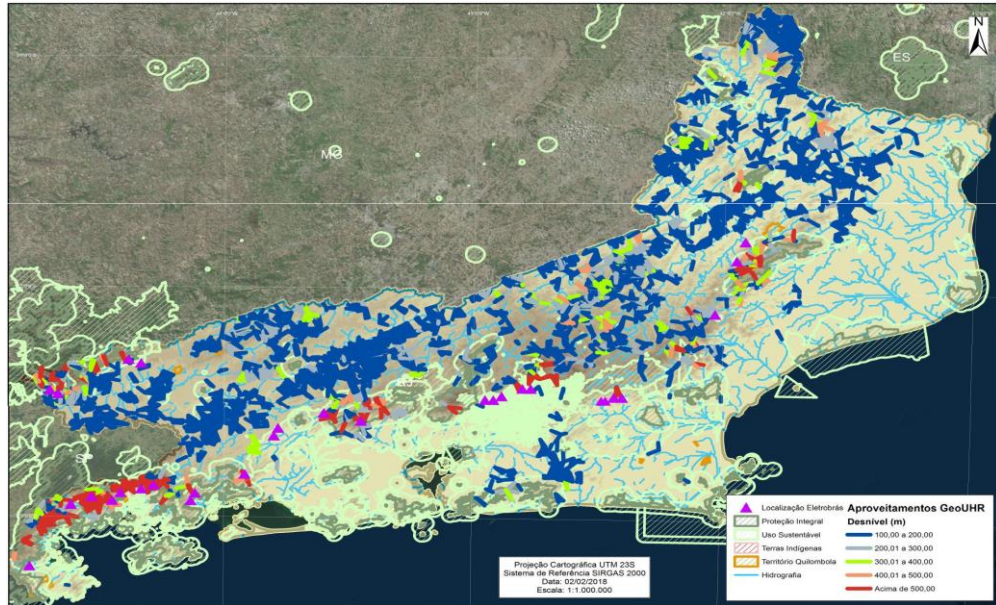


Figura 11 - Locais propícios a implantação de UHR identificados pelo GeoUHR para o RJ, classificados por desnível, Fonte: Elaboração EPE

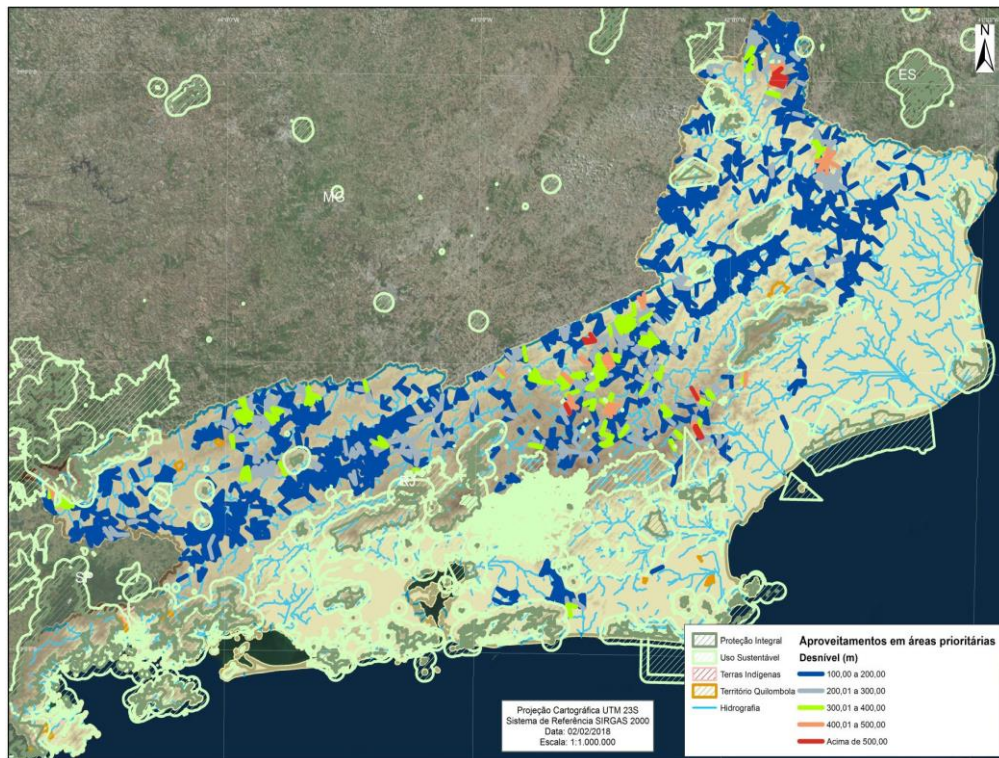


Figura 12 - Locais propícios a implantação de UHR identificados pelo GeoUHR para o RJ, fora de áreas protegidas, classificados por desnível, Fonte: Elaboração EPE

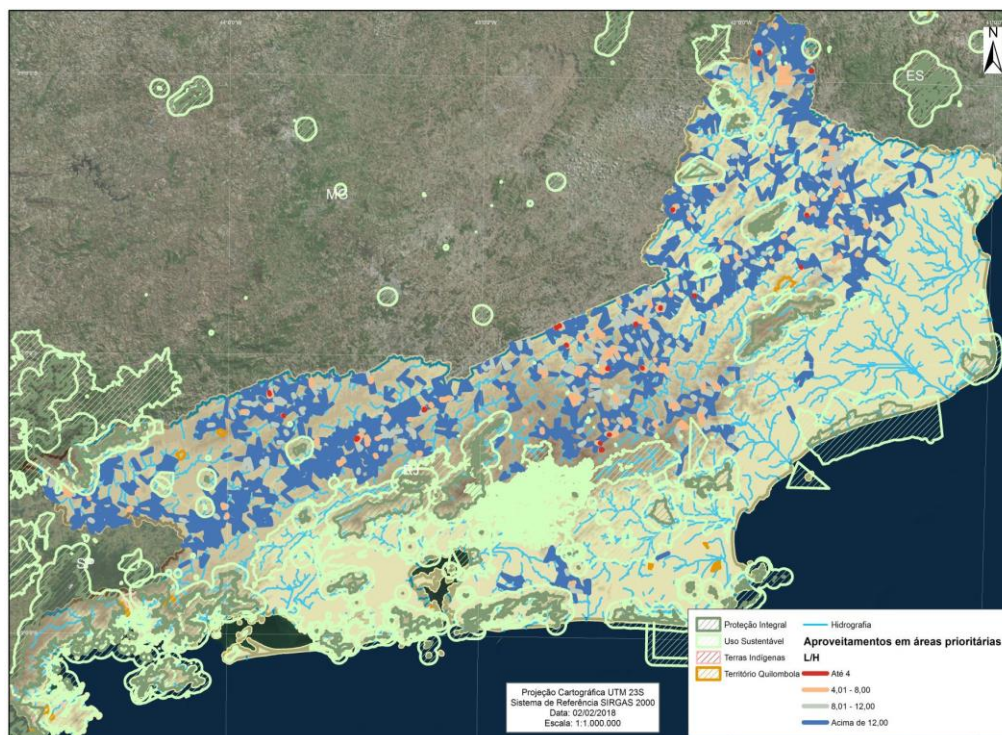


Figura 13 - Locais propícios a implantação de UHR identificados pelo GeoUHR para o RJ, fora de áreas protegidas, classificados por relação L/H, Fonte: Elaboração EPE

Deve ser observado o caráter preliminar dos resultados apresentados, devido às considerações associadas à esta fase do estudo. Assim, o potencial e os locais mais favoráveis à implantação de UHR só poderão ser estabelecidos de forma definitiva após a conclusão dos Estudos de Inventário.

Entre os fatores que condicionam os resultados finais do Inventário e que serão contemplados nas fases seguintes, podem ser destacados:

- **aspectos geológicos-geotécnicos:** os locais são determinantes para o arranjo e características da usina e têm importância acentuada em projetos com obras subterrâneas significativas, como é o caso da maioria das UHR avaliadas. Estes aspectos irão determinar a concepção dos reservatórios e barramentos (incluindo o deplecionamento admissível e volume útil), a concepção do circuito hidráulico, dos túneis de acesso e auxiliares, as condições de fundação, os materiais, os métodos construtivos, o cronograma de implantação e os custos associados;
- **mapas e dados cartográficas:** mais precisas devem ser utilizadas para uma definição mais adequada dos reservatórios e, portanto, da energia

armazenada, barramentos e demais estruturas do aproveitamento, com reflexos na concepção da UHR, nas características operativas e os seus custos associados;

- **aspectos hidrometeorológicos:** necessários para avaliação do enchimento da usina, para o dimensionamento de estruturas hidráulicas como o vertedouro e desvio do rio (reservatório inferior) e para uma avaliação mais detalhada das características operativas (como a estimativa das perdas por evaporação);
- **sistemas de transmissão associados:** custos e restrições relacionados à conexão e linhas de transmissão, bem como as necessidades elétricas locais do sistema, têm potencial para influenciar a hierarquização dos locais com condições mais favoráveis à implantação de UHR;
- **aspectos socioambientais:** realizar um diagnóstico mais apropriado dos impactos locais associados a UHR, e auxiliarão a composição de custos, como aqueles relacionados a aquisição de terras, desapropriações, programas sociais e programas ambientais, previsão de outros usos da água, vazão remanescente, entre outros;

As formas de avaliação dos benefícios de cada UHR e de remuneração, constituem fatores condicionantes das concepções e escolhas de projeto conforme relação custo-benefício e para a seleção dos “melhores” aproveitamentos de forma mais adequada, identificando aqueles que são mais atraentes para as necessidades do sistema.

Assim, para as fases de Inventário que envolvem estudos mais aprofundados de cada UHR, a luz de novas informações, cabe uma reavaliação/aperfeiçoamento das premissas e critérios de projeto no sentido de possibilitar a caracterização mais adequada de cada UHR selecionada.

Considerando as particularidades associadas às usinas hidrelétricas reversíveis, nota-se a ausência de normativos e procedimentos específicos destinados a Estudos de Inventário de UHR. Neste sentido, os estudos a serem desenvolvidos futuramente poderão fornecer subsídios para a elaboração de instrumentos que contenham a abrangência e forma de desenvolvimento de estudos para obtenção de resultados

representativos, comparáveis e adequados aos objetivos a que se destinam.

Adicionalmente, cabe informar que neste mapeamento elaborado pela EPE 13/02/2019 a Metodologia e Resultados Preliminares para o estado de Rio de Janeiro, nº. EPE-DEE-NT-006/2019-R0 com a finalidade de mapear locais favoráveis para a implantação de UHR, não foi mencionado em nenhum momento quaisquer potencial e/ou opção de utilizar a água do mar para o armazenamento e geração de energia, e inclusive o estado do Rio de Janeiro – RJ possui uma vocação que precisa ser explorado dado as suas características geomorfológicas e a sua extensa costa com elevadas diferenças de níveis

Neste sentido, enfatiza-se que já possuem tecnologia de armazenamento bombeado de água do mar, não havendo necessidade de formar um reservatório inferior, e o abastecimento de água do mar é praticamente infinita, tornando possível a construção de grandes centrais eléctricas. As principais questões que precisam ser considerados ao usar água do mar são os efeitos corrosivos de sal nos equipamentos, o impacto nos organismos marinhos e o impacto ambiental da água do mar liberada da parte superior reservatórios.

Após realizar testes de verificação, a J-POWER (empresa chinesa), iniciou sua operação em 1999, com potencial de 30 MW, possuindo uma queda bruta de 136 metros desde a tomada d'água no reservatório superior, localizado a 600 metros da costa, até a turbina ao nível do oceano, operando e mantendo o primeiro sistema de água do mar do mundo usina hidrelétrica reversível, em Kunigami, Okinawa.

Okinawa Yanbaru Seawater Pumped Storage Power Station



Figura 8 - UHR Okinawa Yanbaru, utilização de água do mar.

6 A IMPORTÂNCIA DAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS PARA INTEGRAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA.

A recente expansão das fontes renováveis para a geração de energia elétrica é resultado do aumento dos custos dos combustíveis fósseis e da crescente preocupação com os impactos ambientais e as mudanças climáticas. Essa expansão foi favorecida por avanços tecnológicos e pela redução dos custos de implantação nos últimos anos.

Entretanto, a natureza intermitente e sazonal dos recursos naturais das usinas solares e eólicas tem impactado a operação do sistema elétrico. O armazenamento em situações de alta produção surge como uma alternativa essencial para equilibrar a carga do sistema, mantendo baixos níveis de emissão de gases de efeito estufa e proporcionando outros benefícios.

Além disso, o *curtailment*, que se refere à redução da geração de energia renovável quando a demanda é baixa ou a capacidade de transmissão é insuficiente, torna-se uma preocupação crescente. Essa medida é frequentemente implementada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) para assegurar a segurança e a estabilidade da rede elétrica. As principais causas dessa ação podem ser classificadas em quatro categorias:

- i) Razão de Disponibilidade Externa - Elétrica (REL): Refere-se à indisponibilidade causada por problemas em linhas de transmissão, transformadores ou subestações.
- ii) Razão de Confiabilidade (CNF): Relaciona-se à necessidade de manter a confiabilidade do sistema de transmissão, mesmo na ausência de falhas diretas nos equipamentos. Nos últimos anos, esses eventos têm se tornado mais frequentes, especialmente em estados como o Rio Grande do Norte, que apresenta uma alta concentração de usinas eólicas.
- iii) Razão Energética (ENE): Diz respeito à impossibilidade de alocar a energia gerada diretamente para a carga, devido à falta de demanda ou à capacidade de transmissão disponível na região. Esse tipo de *curtailment* é comum durante períodos de menor consumo, quando a geração de energia excede a capacidade do sistema de absorção.

- iv) Restrições do Parecer de Acesso (PAR): Algumas limitações são estabelecidas diretamente nos pareceres de acesso das usinas, definindo previamente os limites de injeção de potência para não comprometer a estabilidade do sistema.

Segundo a consultoria Epowerbay, após compilado o relatório sobre curtailment disponibilizado pela ONS, elaborou um dashboard, apresentado na Figura 09, resumo que o mês de setembro de 2024, o balanço do mês de setembro revela um aumento expressivo nos cortes de geração, atingindo 2,02 milhões de MWh (2.800 MWm), um crescimento de 23% em relação a agosto. Os prejuízos são alarmantes para os empreendedores, sendo que os cortes por confiabilidade, representam 66% do total e os estados mais impactados são RN e CE com destaque em vermelho e alaranjado indicado no mapa por estado.

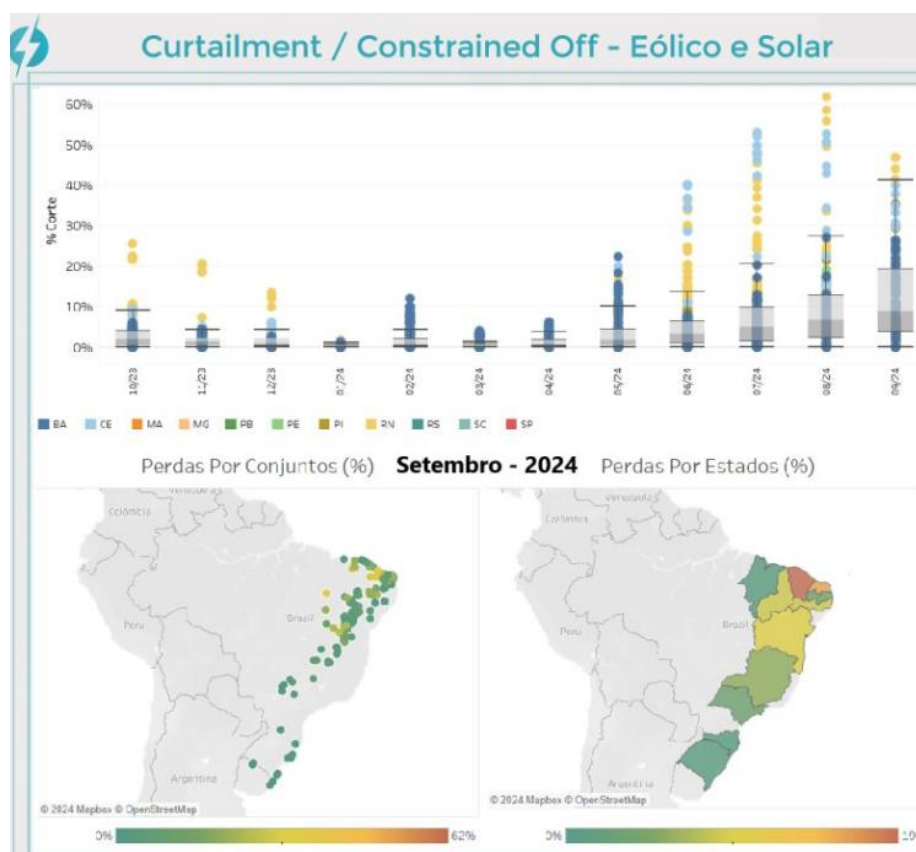


Figura 9 - Relatório sobre Curtailment, com dados disponibilizados pela ONS, elaborado pela EPOWERBAY.

As usinas hidrelétricas reversíveis podem ajudar a mitigar esse problema, armazenando energia em vez de descartá-la, principalmente no caso de *curtailment* por razão energética.

A tecnologia de grande escala para atender a essas necessidades é o bombeamento hidráulico por meio das usinas hidrelétricas reversíveis, que oferecem maior eficiência, tempos de resposta mais rápidos e vida útil mais longa em comparação com outras alternativas.

Na China, responsável pelo desenvolvimento de quase 90 gigawatts (GW) em projetos desse tipo, essas verdadeiras “baterias de água” são consideradas também como recursos flexíveis à disposição do planejamento do sistema de transmissão. Como ativos de transmissão, as usinas reversíveis apoiam a integração de diversas fontes renováveis para atender o leste do país, onde estão localizadas as principais cidades e cargas elétricas.

Uma diferença fundamental entre o cenário dos anos 1960 e os dias atuais é que as variações associadas ao vento e à irradiação solar são muito menos previsíveis do que os ciclos de variação da demanda, tornando a viabilização de alternativas de armazenamento ainda mais crucial.

No contexto da transição energética, as “baterias de água” diminuem o risco de que as redes elétricas do futuro não consigam fornecer energia confiável sem recorrer a fontes de backup com alto teor de carbono.

Cabe destacar que a Associação Hidrelétrica Internacional (IHA) disponibiliza um mapa com a localização de todos os projetos de usinas hidrelétricas reversíveis em operação, em construção ou em planejamento, conforme link: [Pumped Storage Tracking Tool: International Hydropower Association](#).

Entretanto, ao consultar essa plataforma, que conta com uma ferramenta de rastreamento de Armazenamento Bombeado de Energia Hidrelétrica da IHA e que mapeia os locais e dados para projetos de armazenamento bombeado existentes e planejados, infelizmente, por falta de recursos e iniciativas com diretrizes de planejamento energético Brasileiro, não apontam quaisquer projetos em desenvolvimento no Brasil e nem mesmo apresentam os ativos em operação citados anteriormente.

7. RESUMO DOS PRINCIPAIS DESAFIOS PARA AS UHR E RECOMENDAÇÕES

Na Tabela 1 a seguir apresenta os principais desafios identificados para a inserção das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) no sistema elétrico brasileiro, bem como os possíveis encaminhamentos para enfrentá-los. É importante ressaltar que esta lista não pretende esgotar as discussões sobre o tema, mas sim oferecer uma base para futuras reflexões e análises.

Adicionalmente, é fundamental reconhecer que, além dos desafios técnicos, a inserção das UHR está intimamente ligada à sua competitividade e atratividade em relação a outras soluções tecnológicas. Portanto, modificações em normativos e na estrutura do mercado podem desempenhar um papel crucial em aumentar a competitividade dessas tecnologias e das soluções técnicas alternativas disponíveis. Assim, fomentar um ambiente regulatório favorável será essencial para a promoção e a implementação das UHR no Brasil, contribuindo para uma matriz elétrica mais sustentável e resiliente.

Tabela 1 - Resumo dos Principais Desafios e Recomendações para UHR

Desafios	Recomendações
Diretrizes	Estabelecer Metodologias, Normas e Resoluções da Aneel para desenvolvimento de empreendimentos UHR a partir da Diretrizes do Conselho Nacional de Política Energética - CNPE e Ministério de Minas Energia - MME
Planejamento	i) Aprimorar modelos e metodologias para avaliação de recursos de armazenamento no planejamento conjunto da geração e da transmissão. Como destaque os potenciais identificados que estão próximos dos centros carga de interesse.
Disponibilidade de projetos	i) Realizar estudos de inventário de UHR, mapeando locais favoráveis, determinar características principais e hierarquizar aproveitamentos, conforme critérios técnicos, econômicos e socioambientais, para estudos detalhados posteriores.
Licenciamento ambiental e uso do recurso hídrico	i) Adequar procedimentos de licenciamento ambiental e outorga do uso da água para o caso específico de UHR (para o armazenamento ou para o primeiro enchimento e reposição). Avaliar a possibilidade minimização de impactos ambientais com a utilização de reservatórios existentes e/ou novos com pequena área inundada; ii) Realizar estudos para avaliação dos impactos e benefícios associados as UHR.
Outorga	ii) Adaptar normativos para reger o desenvolvimento de estudos de UHR e estabelecer procedimentos para a concessão ou autorização deste tipo de empreendimento. Possibilidade de implementação a partir de Outorga de Autorização nos mesmos moldes das UTEs
Acesso a rede e Operação	i) Adequar procedimentos de rede para a inserção e operação das UHR.

Desafios	Recomendações
Valoração e benefícios ao SIN	i) Realizar avaliação quantitativa dos custos e dos possíveis benefícios das UHR ao sistema interligado.
Atratividade financeira	i) Avaliar e criar mecanismos e modelos de negócio que permitam maior previsibilidade da receita e adequada alocação de riscos.
Remuneração e contratação	i) Avaliar a possibilidade e as condições necessárias para a contratação e remuneração das UHR por mecanismos de capacidade.
	ii) Avaliar a necessidade sistêmica e regulamentar a comercialização de outros serviços e produtos, como aqueles associados a flexibilidade e à transmissão (adiamento do investimento).
	iii) Avaliar a Possibilidade de competição em Leilão de Capacidade e pela oferta de valor sistêmico agregado e não por disputa de concessão por meio de inventário hidrelétrico ou processo equivalente.
	iii) Avaliar criação de mercado competitivo para alguns serviços ancilares.
Necessidade de especialização dos profissionais na esfera governamental e na iniciativa	i) Fomentar ações de capacitação para os agentes envolvidos.

Não obstante aos desafios e recomendações elencadas acima as UHRs, por estarem localizadas perto do centro de carga, não concorrem com os serviços hoje prestados pelas usinas hidrelétricas interligadas no sistema interligado nacional (SIN), mas prestam um serviço de armazenamento de energia, com benefícios a ele associados, conforme lista não exaustiva:

- Benefícios regionais de atendimento nos horários de maior necessidade de capacidade de ponta, mesmo em situações de escassez hidrológica (circuito de fluxo da água fechado, praticamente sem interferência com um curso da água de porte);
- Aumento da confiabilidade da rede;
- Rápida despachabilidade ou ajustes às variações da carga;
- Contribuição para correção de frequência/tensão;
- Redução ou otimização das necessidades de transmissão, entre outros.

A maturidade da tecnologia de armazenamento através de usinas reversíveis é das mais consolidadas do mundo, em termos de capacidade instalada e volumes armazenados, devido à sua flexibilidade, possibilidades de armazenamento em larga escala e benefícios para as operações da rede, os sistemas do tipo UHR permitirão às empresas de energia o equilíbrio eficiente da rede, habilitando o desenvolvimento de novos portfólios de energia renovável.

Na verdade, a instalação de geração renovável intermitente adicionou um novo grau de incerteza para o despacho de energia interligada do sistema. O armazenamento bombeado é, portanto, definido para desempenhar um papel fundamental na integração de volumes significativos de energias renováveis à rede, enquanto ajuda os países cumprirem suas metas ambiciosas de reduzir as emissões de gases do efeito estufa e de construir capacidade adicional de energia renovável limpa, segundo indicado pela EASE- European Association for Storage of Energy.

Além disso, a Figura 17 apresenta um resumo comparativo das tecnologias de armazenamento, sendo que foi possível observar que as UHR se apresentam como o sistema de armazenamento mais consolidado no mundo, seguido dos sistemas de armazenamento a ar comprimido, ainda que em volumes menores, as usinas estão em operação há mais de 30 anos. E as demais tecnologias ainda são incipientes, com algumas opções tendo grande potencial no curto e médio prazo, como as baterias, e outras com potencial no longo prazo e para armazenamentos de maiores capacidades, como as usinas de hidrogênio.







	Reversíveis	Baterias	Hidrogênio	Ar Comprimido	Ar Liquefeito
 Capacidade por Usina	Até 3 GW	Até 300 MW	1kW – 1 GW	Até 320 MW	Modular, até 650 MW
 Ciclos	Não há limites	2.000 – 10.000	n.a.	n.a.	22.000 – 30.000
 Vida Útil	Até 80 anos	15 – 20 anos	5 – 30 anos	Mais de 30 anos	30 – 40 anos
 Tempo de Reação	Reação Alguns segundos Descarga até 10h	Reação Alguns segundos Descarga até 4h	Reação Alguns segundos Descarga até semanas	Reação Alguns minutos Descarga até 10 horas	Reação Mais de 5 minutos Descarga até 24 horas
 Preço	Total: 106 – 200 US\$/kWh	Total: 393 – 581 US\$/kWh	Energia 1 – 12 US\$/kWh Capacidade 2.400 – 6.000 US\$/kW	Total: 94 – 229 US\$/kWh	Energia 72 – 720 US\$/kWh Capacidade 600 – 4.200 US\$/kW
 Round Trip Efficiency:	70% - 85%	90% - 98%	20% - 40%	Aprox. 55%	50% - 95%

Figura 17 – Resumo das características por tecnologia. Fonte: European Association for Storage of Energy (EASE)

Nos últimos planos decenais de energia publicados pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, há mais de 5 ciclos de planejamento decenal, tem adotado como alternativa essencial para equilibrar a carga do sistema prevendo ser atendido por

usinas térmicas, fruto de recente leilão de reserva de capacidade, com isso as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) podem representar um importante recurso para o futuro, uma vez que possuem atributos compatíveis com as crescentes necessidades do SIN. De fato, esse tipo de empreendimento se revela como uma alternativa tecnológica capaz de auxiliar no atendimento aos horários de ponta, provendo flexibilidade necessária para atender ao sistema a qualquer hora do dia e em resposta à variação instantânea da carga e demanda no curto prazo com baixo custo de energia LCOE - Custo Nivelado de Energia, uma métrica que compara o custo de produção de eletricidade entre diferentes fontes de geração comparado com as demais tecnologias apresentadas na Figura 17.

8. CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a importância das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) no contexto da transição energética e da crescente integração de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira. Em um cenário onde a demanda por soluções sustentáveis se intensifica, as UHR emergem como uma tecnologia viável para equilibrar a geração intermitente de energia e garantir a confiabilidade do sistema elétrico.

As UHR se destacam por sua eficiência, capacidade de armazenamento e robustez, características que as tornam essenciais para o gerenciamento das oscilações de geração, especialmente em um ambiente dominado por fontes eólica e solar e com forte previsão de crescimento, conforme o Plano Decenal de Energia PDE-2034, cujas particularidades de intermitência e sazonalidade representam desafios significativos.

O presente estudo evidenciou que, embora o Brasil tenha um potencial significativo para o desenvolvimento de UHR, as condições regulatórias e os modelos de negócios ainda não são suficientemente atrativos para fomentar seu crescimento e atrair investimentos e competitividade para o setor

A análise de experiências internacionais mostrou que, em lugares como a China, as UHR têm sido fundamentais para a integração de diversas fontes renováveis, atuando como verdadeiras "baterias de água". Isso ressalta a necessidade de adaptação do

Brasil a essa realidade, visando não apenas a atração de investimentos, mas também a criação de um ambiente regulatório favorável que promova a competitividade das UHR em relação a outras soluções tecnológicas em crescimento.

Os desafios identificados, como a necessidade de diretrizes claras, planejamento eficiente e adequação dos processos de licenciamento, devem ser abordados com urgência. As recomendações apresentadas neste trabalho visam estabelecer um marco regulatório que facilite o desenvolvimento de projetos de UHR, garantindo a sustentabilidade e a resiliência da matriz elétrica brasileira.

Em suma, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis podem desempenhar um papel crucial na modulação da curva de carga, especialmente em um cenário de crescente demanda e redução da geração solar ao entardecer. A adoção dessa tecnologia não apenas mitigará problemas como o *curtailment*, mas também contribuirá para uma matriz elétrica mais equilibrada e ambientalmente responsável, alinhada com os compromissos globais de descarbonização. Portanto, é imperativo que ações sejam tomadas para integrar as UHR de forma eficaz na política energética brasileira, garantindo um futuro energético mais sustentável e confiável.

9. REFERÊNCIAS

MME/EPE, PLANO DECENAL DE ENERGIA. DISPONÍVEL NAS PUBLICAÇÕES, LINK: PUBLICAÇÕES 2030 A 2034

NOTA TÉCNICA EPE-DEE-NT-006/2019-R0 VOLTADA AOS ESTUDOS DE INVENTÁRIO DE UHR, LINK: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados_abertos/publicacoes/nt-006-2019-estudos-de-inventario-de-usinas-hidreletricas-reversiveis

FERRAMENTAS E ESTUDOS DE UHR, LINK: [HTTPS://WWW.EPE.GOV.BR/PT/PUBLICACOES-DADOS-ABERTOS/PUBLICACOES/FERRAMENTAS-GEOUHR-I-E-GEOUHR-II](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/ferramentas-geouhr-i-e-geouhr-ii)

ARENA – AUSTRALIAN RENEWABLE ENERGY AGENCY, AUSTRALIAN GOVERNMENT, AN ATLAS OF PUMPED HYDRO ENERGY STORAGE, 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://ARENA.GOV.AU/PROJECTS/ATLAS-PUMPED-HYDRO-ENERGY-STORAGE/](https://arena.gov.au/projects/atlas-pumped-hydro-energy-storage/). ACESSO EM: 10 OUT. 2024.

CESP, IPT, INVENTÁRIO DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS JUNTO ÀS SERRAS GERAL E DA MANTIQUEIRA NO ESTADO DE SÃO PAULO – PRÉ-INVENTÁRIO, RELATÓRIO N° 13.197, 1979.

CHAUDHRY, M. HANIF, APPLIED HYDRAULIC TRANSIENTS, 3° ED., SPRINGER VERLAG NY, 2013.

EERA – EUROPEAN ENERGY RESEARCH ALLIANCE, TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS FOR PUMPED-HYDRO ENERGY STORAGE, JOINT PROGRAMME ON ENERGY STORAGE, MECHANICAL STORAGE SUBPROGRAMME, 2014. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.EERA-SET.EU/WP-CONTENT/UPLOADS/TECHNOLOGICAL-DEVELOPMENTS-FOR-PUMPED-HYDRO-ENERGY-STORAGE_EERA-REPORT-2014.PDF](https://www.eera-set.eu/wp-content/uploads/technological-developments-for-pumped-hydro-energy-storage_eera-report-2014.pdf). ACESSO EM: 7 FEV. 2024.

ELETOBRÁS, CIARLINI, USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS: LEVANTAMENTO DO POTENCIAL – REGIÃO SUDESTE, ESPÍRITO SANTO, MINAS GERAIS E RIO DE JANEIRO, 1987.

ELETOBRÁS, CIARLINI, USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS: LEVANTAMENTO DO POTENCIAL – REGIÃO NORDESTE, ALAGOAS, BAHIA, CEARÁ, PARAÍBA, PERNAMBUCO, PIAUÍ, RIO GRANDE DO NORTE E SERGIPE, 1988.

ELETOBRÁS, CIARLINI, USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS: LEVANTAMENTO DO POTENCIAL – REGIÃO SUL, PARANÁ, RIO GRANDE DO SUL E SANTA CATARINA, 1988.

IEC 60193, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, HYDRAULIC TURBINES, STORAGE PUMPS AND PUMP-TURBINES - MODEL ACCEPTANCE TESTS, 1999.

IEC 60041, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, FIELD ACCEPTANCE TESTS TO DETERMINE THE HYDRAULIC PERFORMANCE OF HYDRAULIC TURBINES, STORAGE PUMPS AND PUMP-TURBINES, 1991.

IWR – INSTITUTE FOR WATER RESOURCES, DEPARTMENT OF THE ARMY CORPS OF ENGINEERS, AN ASSESSMENT OF HYDROELECTRIC PUMPED STORAGE, 1981. DISPONÍVEL EM: [WWW.IWR.USACE.ARMY.MIL/PORTALS/70/DOCS/IWRREPORTS/IWR019-000001-000517.PDF](http://www.iwr.usace.army.mil/portals/70/docs/iwrreports/iwr019-000001-000517.pdf). ACESSO EM: 2 MAR. 2018.

JRC – JOINT RESEARCH CENTRE, ASSESSMENT OF THE EUROPEAN POTENTIAL FOR PUMPED HYDROPOWER ENERGY STORAGE, JRC SCIENTIFIC AND POLICY REPORTS, 2013. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://EC.EUROPA.EU/JRC/SITES/JRCSH/FILES/JRC_20130503_ASSASSESSMENT_EUROPEAN](https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/jrc_20130503_assessment_european)

MIKHAILOV, I.E., POLIKARPOV, YU. V., FINK A.K., HEAD-LOSS REDUCTION IN THE WATER-

INTAKES/OUTLETS OF PUMPED-STORAGE TOWER (SHAFT)-TYPE POWER PLANTS, 1992.

USBR – UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION, ESTIMATING REVERSIBLE PUMP-TURBINE CHARACTERISTICS, ENGINEERING MONOGRAPH N° 39, 1977. DISPONÍVEL EM <[HTTPS://WWW.USBR.GOV/TSC/TECHREFERENCES/HYDRAULICS_LAB/PUBS/EM/EM39.PDF](https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/hydraulics_lab/pubs/EM/EM39.pdf)>.

USBR – UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION, INTAKE VORTEX FORMATION AND SUPPRESSION AT HYDROPOWER FACILITIES, 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.USBR.GOV/RESEARCH/PUBLICATIONS/DOWNLOAD_PRODUCT.CFM?ID=2494](https://www.usbr.gov/research/publications/download_product.cfm?id=2494)>. ACESSO EM: 2 MAR. 2024.

ZUCULIN, S.; PINTO, M. A. R. R. C.; BARBOSA, P. S. F.; TIAGO FILHO, G. L. A RETOMADA DO CONCEITO DE EFICIÊNCIA DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS (UHR) NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO. PROJETO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO. COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO (CESP), 2014.

BUBLITZ, A., KELES, D., ZIMMERMANN, F., 2019. “A SURVEY ON ELECTRICITY MARKET DESIGN: INSIGHTS FROM THEORY AND REAL-WORLD IMPLEMENTATIONS OF CAPACITY REMUNERATION MECHANISMS”. ENERGY ECONOMICS 80 (2019) 1059-1078.

BARBOUR, E., WILSON, I.A.G., RADCLIFFE, J., DING, Y., LI, Y., 2016. “A REVIEW OF PUMPED HYDRO ENERGY STORAGE DEVELOPMENT IN SIGNIFICANT INTERNATIONAL ELECTRICITY MARKETS”. ELSEVIER RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, VOLUME 61, APRIL 2016, PAGES 421-432.

CAMBRIDGE INSTITUTE FOR SUSTAINABILITY LEADERSHIP AND ENERGY POLICY RESEARCH GROUP (2017) MARKET DESIGN FOR A HIGH-RENEWABLES EUROPEAN ELECTRICITY SYSTEM. CAMBRIDGE, REINO UNIDO. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.CISL.CAM.AC.UK/PUBLICATIONS](http://www.cisl.cam.ac.uk/publications)

DEANE, J. PAUL; GALLACHÓIR, B.P.Ó; McKEOGH, E.J. (2010). “TECHNO-ECONOMIC REVIEW OF EXISTING AND NEW PUMPED HYDRO ENERGY STORAGE PLANT.” RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS (14.4); PP. 1,293– 1,302.

IHA – INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. THE WORLD’S WATER BATTERY: PUMPED HYDROPOWER STORAGE AND THE CLEAN ENERGY TRANSITION.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. RENEWABLES 2018: ANALYSIS AND FORECAST TO 2023. 2018 HERNANDEZ ALVA, C. A.; LI, X. POWER SECTOR REFORM IN CHINA AN INTERNATIONAL PERSPECTIVE. INTERNACIONAL ENERGY AGENCY INSIGHT SERIES 2018.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IS PUMPED STORAGE HYDROPOWER CAPACITY FORECAST TO EXPAND MORE QUICKLY THAN STATIONARY BATTERY STORAGE? ANALYSIS FROM RENEWABLES 2018

MING, Z., JUNJIE, F., SONG, X., ZHIJIE, W., XIAOLI, Z., YUEJIN, W., 2013. “DEVELOPMENT OF CHINA’S PUMPED STORAGE PLANT AND RELATED POLICY ANALYSIS”. ELSEVIER ENERGY POLICY, VOLUME 61, OCTOBER 2013, PAGES 104- 113.

NORANG, INGUNN. PUMP STORAGE HYDROPOWER FOR DELIVERING BALANCING POWER AND ANCILLARY SERVICES: A CASE STUDY OF ILLVATN PUMP STORAGE POWER PLANT. MASTER THESIS. NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY TRONDHEIM. JUNHO, 2015.

PÉREZ-DÍAZ, J.I., CAVAZZINI, G., BLÁZQUEZ, F., PLATERO, C., FRAILE-ARDANUY, J., SÁNCHEZ, J.A. AND CHAZARRA, M., TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS FOR PUMPED-HYDRO ENERGY STORAGE, TECHNICAL REPORT, MECHANICAL STORAGE SUBPROGRAMME, JOINT PROGRAMME ON ENERGY STORAGE, EUROPEAN ENERGY RESEARCH ALLIANCE, MAY 2014.

RAIMUNDO, D. R. ANÁLISE AMBIENTAL DE PROJETO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA VIA USINA

HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL. DISSERTAÇÃO (MESTRADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2019.

REUTERS, 2019 CHINA PLANS MASSIVE PUMPED HYDRO INVESTMENT TO EASE RENEWABLE ENERGY CURTAILMENTS. DISPONÍVEL EM: [HTTP://IEEFA.ORG/CHINA-PLANS-MASSIVE-PUMPED-HYDRO-INVESTMENT-TO-EASE-RENEWABLE-ENERGY-CURTAILMENTS/](http://ieefa.org/china-plans-massive-pumped-hydro-investment-to-ease-renewable-energy-curtailments/)

SALEVID, KARIN. MARKET REQUIREMENTS FOR PUMPED STORAGE PROFITABILITY: EXPECTED COSTS AND MODELLED PRICE ARBITRAGE REVENUES, INCLUDING A CASE STUDY OF JUKTAN. THESIS. UPSALLA UNIVERSITET. AGOSTO 2013.

ZHANG, S.; ANDREWS-SPEED, P.; PERERA P. THE EVOLVING POLICY REGIME FOR PUMPED STORAGE HYDROELECTRICITY IN CHINA: A KEY SUPPORT FOR LOW-CARBON ENERGY. APPLIED ENERGY 150 (2015) 15–24.