



GRUPO DE ESTUDO GGH

Roadmap para Inserção de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) na Matriz Energética Brasileira

**Ronaldo Antonio de Souza, André Makishi, Caio Monteiro Leocádio,
Patrícia Asfor Parente**

Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

RESUMO

No contexto dos novos desafios do sistema elétrico brasileiro com o aumento das fontes renováveis não controláveis, como solar e eólica, a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis (UHRs) na matriz elétrica brasileira surge como solução promissora para enfrentamento desses desafios.

De forma geral, as UHRs operam armazenando energia pela ação do bombeamento de água entre reservatórios durante momentos de baixa demanda e produzindo eletricidade em momentos de maior demanda ou necessidade sistêmica. Essa tecnologia oferece diferentes benefícios decorrentes de sua capacidade de armazenamento e flexibilidade operativa.

Este artigo traça um panorama dos aspectos técnicos, regulatórios, econômicos e ambientais necessários para viabilizar essas usinas no Brasil, destacando a importância de projetos-piloto. Esses projetos-piloto são essenciais para validar questões tecnológicas, econômicas e regulatórias antes da implementação em larga escala. Estudos preliminares já identificaram potenciais locais no Rio de Janeiro e São Paulo, com base em características geográficas e socioambientais favoráveis.

Os resultados do estudo apontam que, apesar do grande potencial das UHRs no Brasil, sua implementação enfrenta desafios significativos, especialmente no que se refere a barreiras regulatórias. O marco regulatório atual precisa de adaptações para incluir as UHR no processo de outorga e nos critérios de uso da rede elétrica.

Mecanismos de remuneração e contratação adequados, como contratos de longo prazo e participação em mercados de capacidade, serão cruciais para garantir a financiabilidade e viabilidade econômica das UHRs. A experiência internacional mostra que a remuneração por capacidade e flexibilidade pode tornar esses projetos financeiramente atrativos, principalmente em mercados com alta penetração de renováveis. As UHRs possuem atributos compatíveis com as necessidades futuras do Sistema Interligado Nacional (SIN), mas sua inserção ainda depende de avanços regulatórios e de modelos de negócios que possibilitem atrair investimentos e remuneração de seus variados produtos e serviços oferecidos.

PALAVRAS-CHAVE

Usinas Hidrelétricas Reversíveis, Armazenamento de Energia, Fontes Renováveis, Regulação Energética.

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e oportunidades

Apesar do Brasil ser referência mundial em geração hidrelétrica convencional, o país não possui hidrelétricas reversíveis atualmente em operação. A China é o país com maior capacidade instalada em hidrelétricas reversíveis, o que corresponde a 11% da potência hídrica chinesa. O Japão é segundo país com maior potência hídrica reversível no mundo e 55% da sua capacidade instalada hídrica é dessa fonte. Atualmente, o Brasil possui 109,8 GW de capacidade instalada originária de hidrelétricas convencionais.

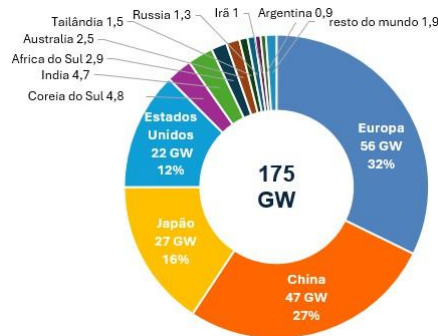


Figura 1: Capacidade instalada de usinas hidrelétricas reversíveis no mundo em 2022 (Fonte: World Hydropower Outlook - IHA, 2023)

Historicamente a matriz elétrica brasileira tem tido grande participação de hidrelétricas convencionais (UHEs). Isso permitiu a postergação do uso de tecnologias de armazenamento como as UHRs. Entretanto, nos últimos anos, não houve implantação significativa de novas UHEs, sobretudo aquelas com grande capacidade de armazenamento e regularização. Somado a isso, houve o aumento da inserção de fontes renováveis variáveis, provocando mudanças na matriz elétrica brasileira. Essa transformação trouxe novos desafios para o Sistema Interligado Nacional (SIN), como a crescente necessidade de capacidade de armazenamento e de flexibilidade operativa. Nesse contexto, a inserção de UHRs na matriz elétrica brasileira pode auxiliar na solução desses desafios, no entanto, conta com desafios regulatórios, econômicos, técnicos e socioambientais para sua implementação.

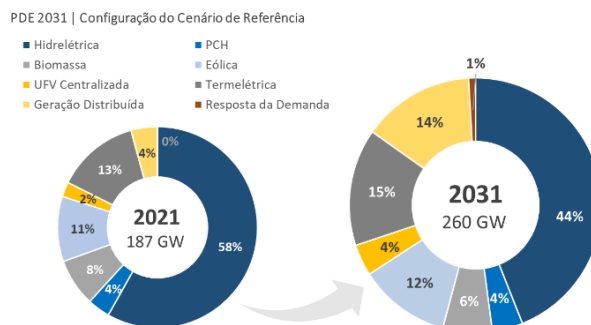


Figura 2: Expansão da Matriz Elétrica Brasileira (Fonte: PDE 2031)

1.2 Objetivo

O objetivo deste estudo é apresentar um panorama para a inserção da tecnologia de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, cobrindo aspectos regulatórios, técnicos, econômicos e socioambientais, oferecendo assim uma base para discussões voltadas a formulação de políticas, investimentos e estratégias de desenvolvimento.

2.0 ESTADO DA ARTE

2.1 Arranjos típicos, atributos e tecnologia

As UHRs operam turbinando ou bombeando água entre dois reservatórios situados em diferentes elevações. Devido as perdas, tanto no modo de geração quanto no modo de bombeamento, as UHRs normalmente têm um consumo de energia maior que a geração, caracterizando-se como um consumidor líquido, possuindo rendimento médio de ciclo em torno de 75%. Podem ser de bombeamento puro, quando o potencial energético é criado puramente pela ação de bombeamento, ou mistas, quando há aflúncias em seu reservatório superior que permitam produzir energia acima daquela armazenada pelo bombeamento.

De acordo com suas características de tanto consumir, quanto gerar energia, as UHRs podem trazer novos desafios para a operação do sistema elétrico. As usinas de ciclo aberto e semiaberto podem eventualmente afetar a operação da cascata, impactando as demais usinas a jusante, caso existam. Em períodos secos, estando o reservatório cheio, este pode regularizar o rio, ao passo que estando vazio e sendo necessário o seu enchimento, poderia provocar redução na geração das usinas a jusante. Por outro lado, as UHRs de ciclo fechado possuem uma operação mais simplificada por praticamente não interferir na operação de outras usinas que estejam a jusante em uma cascata. As usinas de ciclo fechado possuem princípio semelhante ao carregamento e descarregamento das baterias de armazenamento de energia. No Brasil, ainda seria necessário definir como seria a operação de usinas de ciclo semiaberto e aberto. Ou seja, como o operador iria estabelecer o melhor instante para realizar o bombeamento, assim como, estabelecer as horas do momento de descarregamento.

Estas usinas também podem ser classificadas quanto ao arranjo dos reservatórios, sendo de ciclo aberto, fechado ou semiaberto. O ciclo fechado envolve o uso de dois reservatórios sem conexão permanente com cursos d'água naturais. Esse arranjo normalmente possui impacto socioambiental e é menos dependente da localização de rios e cursos d'água. Já no ciclo aberto, os reservatórios estão conectados a corpos d'água naturais, como rios ou lagos. Isso requer uma gestão mais cuidadosa do recurso hídrico e pode ter impactos ambientais mais significativos. O ciclo semiaberto combina elementos dos ciclos fechado e aberto. Um reservatório pode ser fechado, enquanto o outro está conectado a um corpo de água natural. Esse arranjo tenta equilibrar os impactos ambientais com a facilidade de acesso à água.

2.2 Aspectos operativos e de planejamento

Conforme destacado na Nota Técnica EPE/DEE/SEG/013/2021, as UHRs possuem atributos valiosos para o Sistema Interligado Nacional (SIN), como a capacidade de atender aos períodos de maior demanda (horários de ponta) com elevada flexibilidade operacional. Essa característica permite que essas usinas desempenhem um papel relevante no suporte à expansão das fontes renováveis, contribuindo para a confiabilidade, estabilidade e segurança do suprimento de energia e potência. Além disso, as UHRs são capazes de fornecer serviços ancilares, como controle de frequência primária e. Nesse contexto, as hidrelétricas reversíveis podem ser uma alternativa atrativa para suprir as crescentes necessidades de capacidade de armazenamento e de flexibilidade do sistema elétrico brasileiro.

Os avanços tecnológicos em turbinas e sistemas de bombeamento permitiram aumentar a eficiência e a flexibilidade operacional das usinas reversíveis. As turbinas-bomba de velocidade variável são exemplos desses avanços. Essa tecnologia oferece vantagens como o controle da energia consumida no modo bomba, a possibilidade de operar com melhor desempenho em uma faixa de quedas mais amplas no modo turbina, além de ou permitir que a usina responda de forma mais rápida e flexível à demanda tanto ativa quanto reativa da rede de energia elétrica. Além disso, usina oferece maior estabilidade no caso de uma queda de tensão, pois reduz a probabilidade de falha de energia e permite uma rápida reinicialização, caso haja uma queda de energia. A implementação de sistemas de controle avançados e soluções de inteligência artificial permitem uma operação mais eficiente e adaptável, otimizando a gestão do armazenamento e da geração de energia.

Para que se possa capturar e quantificar todos os atributos fornecidos pelas UHRs, torna-se necessária a utilização de modelos energéticos de simulação no planejamento e operação do sistema que possibilitem modelagem mais detalhada, de forma individualizada e com menor granularidade temporal. Os modelos utilizados atualmente no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) não possibilitam modelar uma UHR de forma individualizada e com simulações horárias, essenciais para a quantificação dos seus atributos para atendimento a capacidade e flexibilidade de potência fornecidos.

3.0 MAPEAMENTO DO POTENCIAL BRASILEIRO

A identificação de locais favoráveis para a implementação de usinas hidrelétricas reversíveis é uma etapa crucial no processo de planejamento e desenvolvimento desses empreendimentos. Os estudos de inventário desempenham um papel fundamental nesta fase, fornecendo uma análise abrangente das potencialidades hidrelétricas de uma região, considerando aspectos geográficos, ambientais, técnicos e econômicos.

Os estudos de inventário ajudam a mapear potenciais locais, identificando regiões com características geográficas adequadas, como diferenças de altitude entre pontos potenciais para os reservatórios superior e inferior. Neles, são avaliados os impactos ambientais e sociais através de análises preliminares, identificando os possíveis impactos sobre o meio ambiente e comunidades locais, permitindo ainda a escolha de locais com menores implicações negativas e evitando áreas ambientalmente sensíveis. Esses estudos fornecem uma estimativa da viabilidade técnica e econômica, apresentando uma primeira estimativa da capacidade de geração, custos de construção e operação, e potencial retorno sobre o investimento. Por fim, são importantes para orientar a tomada de decisão e informar decisores sobre a viabilidade e priorização de projetos de usinas reversíveis, contribuindo para a alocação eficiente de recursos.

A EPE desenvolveu estudo¹ para o levantamento do potencial de hidrelétricas reversíveis no estado do Rio de Janeiro. O estudo apresentou resultados para um estudo de pré-inventário realizado para o estado do Rio de Janeiro, considerando projetos de ciclo semiaberto (EPE, 2019).

Uma das etapas do estudo consistiu na criação da ferramenta GeoUHR em ambiente ArcGIS para identificação e seleção dos locais. Utilizando um Modelo Digital de Elevação (MDE), a ferramenta identifica locais com características topográficas favoráveis para implantação de UHRs, permitindo ainda considerar outras informações georreferenciadas como áreas urbanas, áreas protegidas e territórios indígenas. Como resultado a ferramenta GeoUHR gera uma planilha com a indicação dos locais potenciais, com o desnível (H) e distância entre reservatórios (L), a relação L/H , área disponível para implantação do reservatório superior e outras informações. Após a etapa de varredura, os locais mais promissores foram utilizados para o pré-dimensionamento das usinas de forma a estimar suas características técnicas principais como capacidade instalada, quantidade de máquinas, quedas e vazões operativas.

3.1 Locais potenciais identificados pela GeoUHR

Os resultados corresponderam a 23 locais com potencial para implementação de UHRs no estado do Rio de Janeiro. Para estes 23 locais identificados foi realizada análise socioambiental preliminar por meio de inspeção visual em imagens de satélite. Essa análise resultou na exclusão de 8 sítios, tendo em vista as áreas urbanas, núcleos populacionais, edificações, atividades agrícolas, estradas e vias locais e remanescente de vegetação, dentre outros aspectos. O resultado da análise correspondeu a 15 locais potenciais pré-dimensionados.

¹ https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-353/EPE-DEE-NT-006_2019-r0.pdf

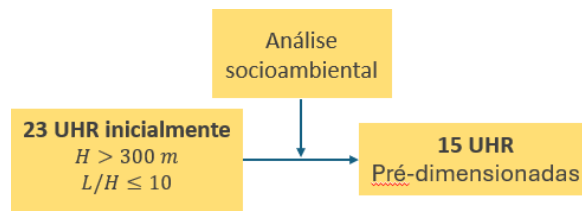


Figura 3: Seleção de UHRs no Estado do RJ (Fonte: EPE, 2019)

Os locais potenciais são indicativos e podem auxiliar em uma futura seleção e desenvolvimento de um projeto-piloto. Apesar da GeoUHR indicar lugares potenciais, é indispensável a realização de visita de campo que pode eventualmente inviabilizar um projeto-piloto devido a restrições locais que o georreferenciamento não seja capaz de capturar. A ferramenta GeoUHR é em código aberto e pode ser parametrizada a fim de abranger mais regiões ou atender outras características como opções de ciclo aberto e fechado.

3.2 Proposta de metodologia para ranqueamento dos projetos com condições mais favoráveis

Considerando-se a seleção dos 23 locais favoráveis no estudo anterior, desenvolveu-se uma metodologia para classificar e hierarquizar aqueles com maior potencial para a implementação de um projeto piloto. A Figura 4 destaca os 15 projetos de circuito semiaberto selecionados, destacando sua posição no ranking e potência associada.

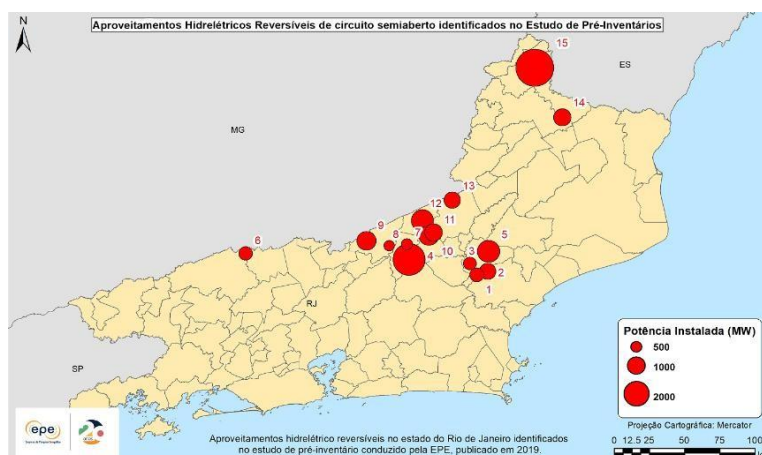


Figura 4: Locais favoráveis para projeto piloto de UHRs de circuito semiaberto no Estado do RJ (Fonte: EPE, 2025)

A metodologia consiste na determinação do índice $PI/(L/H)$ que combina as potências pré-dimensionadas com o índice L/H . Portanto, a menor relação L/H e o maior $PI/(L/H)$ indicam os projetos melhores. De um modo geral, os projetos em questão apresentaram quedas brutas médias iguais ou superiores a 400 m, exceto o projeto de número 10, com queda aproximada de 300 m. No entanto, este se apresentou como um dos melhores por indicar um dos menores custos. Os quatro melhores projetos apresentaram L/H abaixo ou um pouco acima de 8, exceto o de número 4, sendo que o projeto 15 apresentou L/H menor que 6 e a maior potência instalada possível para o local, resultando em uma relação $PI/(L/H)$ acima de 800. Os demais projetos 10, 12 e 4 apresentaram valores acima de 200 para o índice $PI/(L/H)$. O projeto 4 torna-se interessante por ter uma elevada potência a ser instalada, apesar de indicar um maior custo que os demais (maior relação L/H).

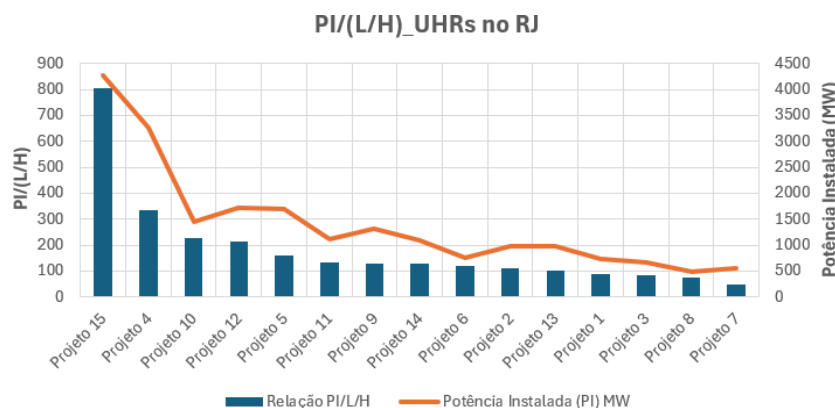


Figura 5: Seleção de projeto piloto de UHRs de circuito semiaberto no estado do Rio de Janeiro (Fonte: EPE, 2025)

De acordo com a maior relação $PI/(L/H)$, os 4 melhores projetos com maiores potências, menores custos e maiores quedas seriam os apresentados na Tabela 1, a seguir.

Projetos UHR no RJ	Potência Instalada (PI) MW	Queda Bruta Média (H)	Relação L/H	Relação $PI/(L/H)$
Projeto 15	4275.7	442	5.3	806.74
Projeto 10	1443.4	311.8	6.4	225.53
Projeto 12	1720.9	438.2	8.1	212.46
Projeto 4	3258.5	400.2	9.8	332.50

PI: Potência Instalada
L: Comprimento do Circuito
H: Queda Bruta Média

Tabela 1 – Características Técnicas dos Projetos Pilotos Selecionados (Fonte: EPE, 2025)

4.0 CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

A estimativa de custos para Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs) enfrenta diversos desafios, entre eles a escassez de dados nas principais fontes internacionais, a heterogeneidade das amostras disponíveis e a ausência de padronização nas estimativas — que frequentemente não discriminam os custos por capacidade instalada, tempo de armazenamento ou tipo de tecnologia (bombeamento por rotação direta ou reversa). Soma-se a isso a incerteza quanto à aplicabilidade desses valores ao contexto brasileiro, especialmente devido à relevância dos custos com obras civis, que tendem a ser menores no Brasil em comparação com os padrões internacionais. Os levantamentos mais recentes dos custos de UHRs consideram capacidades entre 100MW e 1000MW.

Estimativas de custos	PDE 2030	PDE 2031	2023/2024
CAPEX	US\$ 1.300/kW	US\$ 1.300/kW	US\$ 1.200/kW – US\$ 1.600/kW
OPEX	US\$ 15/kW.ano	US\$ 15/kW.ano	US\$ 12/kW.ano – US\$ 20/kW.ano

Tabela 2 – Estimativas de Custos para UHRs (EPE, 2021)

Os principais fatores que influenciam nos custos de investimento são a capacidade instalada (MW), construção de túneis mais longos ou curtos, a altura de queda (L/H), utilização de um reservatório existente, o tamanho dos novos reservatórios a serem construídos, além do tipo de tecnologia utilizada para as unidades reversíveis (rotação fixa/variável, ternário/binário). É estimado que os custos do projeto (por MW) de uma UHR de 1000MW é cerca de 16% menor que os de uma UHR de 100 MW de mesma duração (PNLL, 2020).

As maiores parcelas do CAPEX de um projeto de UHR equivalem à casa de força e ao reservatório; custos com construção e infraestrutura do reservatório variam entre 15% e 35% do CAPEX total, enquanto os referentes à casa de força, equivalem a cerca de 30% a 40%. Além disso, custos de O&M são geralmente menores que 2% do CAPEX.

Todavia, assim como as hidrelétricas convencionais as UHR têm custos relacionados as condições e características locais e com projetos customizados, tornando os investimentos e as proporções de custos variáveis caso a caso.

5.0 ASPECTOS SOCIOAMBIENTAIS

No Brasil, o licenciamento ambiental de obras hidráulicas para exploração de recursos hídricos para fins hidrelétricos, acima de 10MW, dependem de elaboração de Estudo de Impacto Ambiental - EIA e Relatório de Impacto Ambiental - RIMA (Res. Conama 01/86). Não existe regulamentação específica para UHR. Contudo, espera-se que o processo de licenciamento de uma UHR seja similar ao de hidrelétricas convencionais.

Os possíveis impactos socioambientais de UHR estão relacionados às condições específicas dos locais onde serão implantadas (por ex., bioma, vegetação existente, contexto socioeconômico do local ou da região de implantação da usina), ao porte do projeto e às suas características construtivas (por ex., tipologia, formato e tamanho dos reservatórios, regime de operação, extensão das escavações e necessidade, ou não, de construção de barramentos em cursos d'água). Existe grande flexibilidade locacional para implantação de UHR, de maneira que áreas ambientalmente sensíveis (como unidades de conservação) podem ser evitadas. UHR de ciclo fechado, em que ambos os reservatórios estão fora do corpo hídrico, e projetos que utilizem reservatórios existentes podem ser soluções de mais fácil implementação e menores impactos ambientais.

Usinas de ciclo fechado necessitam de água apenas para o enchimento inicial do reservatório, que pode ser entendida apenas como uma captação temporária, e pequena reposição de perdas (por evaporação). Já em projetos de ciclo aberto ou semiaberto, a vazão utilizada pela UHR poderá competir com outras captações e/ou restringir a operação destas. Sobretudo em reservatórios já existentes, sejam para a geração de energia elétrica, de abastecimento público ou de outros usos, e UHRs que operam em regimes sazonais. Para UHRs de operação diária, vale ressaltar que a água retirada dos rios ou reservatórios existentes será devolvida nos momentos de geração.

Portanto, torna-se necessário avaliar a necessidade de adaptações nos normativos, procedimentos e estudos relativos à outorga de direito de uso dos recursos hídricos para acomodar UHRs, incluindo projetos de circuito fechado e uso de reservatórios existentes, ampliar as discussões com órgãos ambientais, reguladores, desenvolvedores e partes interessadas, buscando melhor compreensão das diferentes concepções de projetos, os impactos e as medidas para reduzir, mitigar e compensar seus efeitos e avaliar adaptações na legislação relativa ao licenciamento ambiental para incorporar especificidades das UHR.

6.0 MODALIDADE DE OUTORGA E ASPECTOS REGULATÓRIOS

A Lei nº 9.074/1995 estabelece diretrizes para a outorga de aproveitamentos hidrelétricos. O artigo 5 estabelece quais são os objetos de concessão mediante licitação e o artigo 7 aqueles que são objetos de autorização. Há controvérsias se as UHRs poderiam ser classificadas como hidrelétricas, uma vez que são consumidores líquidos de energia (consumo para o bombeamento maior que a sua geração) e em muitos casos utilizam um potencial criado pela ação de bombeamento e não um recurso natural. No §2º do artigo 5, se estabelece que nenhum aproveitamento hidrelétrico poderá ser licitado sem a definição de "aproveitamento ótimo" pelo poder concedente, podendo ser atribuída ao licitante vencedor a responsabilidade pelo desenvolvimento dos projetos básico e executivo. No §3º do artigo 5, "aproveitamento ótimo" é considerado todo potencial definido em sua concepção global pelo melhor

eixo do barramento, arranjo físico geral, níveis d'água operativos, reservatório e potência, integrantes da alternativa escolhida para a divisão de quedas de uma bacia hidrográfica nos Estudos de Inventário Hidrelétrico da Bacia.

Sobre o aproveitamento ótimo para UHRs, nas de ciclo fechado, este conceito não se aplica, pois estas não estariam inseridas em uma cascata de usinas hidrelétricas de forma a alterar o dimensionamento energético de outros projetos ou a operação das UHEs convencionais que estejam a sua jusante, não interferindo no potencial hidrelétrico da bacia hidrográfica. Para as UHRs de ciclo semiaberto ou semifechado, os aspectos de aproveitamento ótimo são mais importantes, pois estas UHRs podem provocar alterações em toda a operação e geração das UHEs convencionais já existentes no rio ou cascata, em muitas situações de forma positiva, trazendo ganhos energéticos por proporcionar incremento de vazão no rio em determinados períodos. No entanto, aspectos negativos também podem acontecer.

Outro ponto que merece destaque refere-se aos atributos das UHRs, que vão além do produto energia, o que solicita adequações e alterações no conceito de aproveitamento ótimo de forma que possa englobar os requisitos de capacidade e flexibilidade em sua composição e definir os melhores aproveitamentos que atendam a esses novos produtos da melhor forma. Na prática, a atual avaliação do aproveitamento ótimo considera apenas os ganhos de energia firme, conforme Manual de Inventário Hidrelétrico. Aspectos como tempo de geração (descarga) e de bombeamento (carga) também devem ser considerados. Nesse sentido, entende-se que a UHR que compõe o aproveitamento ótimo, de forma ideal, é aquela que proporciona o melhor uso do potencial hidrelétrico para toda a cascata e bacia hidrográfica na qual será inserida, considerando as dimensões de energia, capacidade e flexibilidade.

Como resultado dos avanços graduais sobre a inserção das UHRs no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), o tema ganhou mais relevância com a elaboração da Análise de Impacto Regulatório (AIR) nº 1/2023-SGM-SCE-STD-STE/ANEEL, ao final de 2023. A AIR foi submetida a Consulta Pública Aneel nº 039/2023. Com isso, foram recebidas diversas contribuições de diferentes instituições e agentes do setor. A Análise de Impacto Regulatório destaca alguns objetivos específicos a serem alcançados para a inserção adequada de novas soluções de armazenamento, entre elas as UHRs, por meio de soluções tanto normativas quanto não normativas, conforme apresentado na Tabela 3.

	SOLUÇÕES NORMATIVAS	SOLUÇÕES NÃO- NORMATIVAS
Adaptação da regulação de acesso à rede	<ul style="list-style-type: none"> Definição do MUST/D a ser contratado Definição da forma de contratação do uso da rede (CUST/D) Definição da tarifa de uso de rede a ser aplicada (TUST/D) 	<ul style="list-style-type: none"> Divulgação de dados da regulação e de mercado no sistema elétrico brasileiro
Adaptação da regulação de outorgas	<ul style="list-style-type: none"> Definir modo de outorga para UHR em ciclo fechado ou semiaberto Definir modo de outorga para usinas reversíveis em UHE ou PCH já existentes 	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar projetos de pesquisa e projetos-piloto Aproximar equipes técnicas de referência
Avaliação das opções para estruturas remuneratórias	<ul style="list-style-type: none"> Aprimorar o modo de remuneração que envolva os sistemas com armazenamento 	<ul style="list-style-type: none"> Ampliar o conhecimento sobre os sistemas de armazenamento de energia elétrica
Alinhamento entre os agentes e entidades envolvidas		<ul style="list-style-type: none"> Alinhar agendas entre as instituições

Tabela 3: Objetivos a serem alcançados com a AIR (Fonte: Aneel, 2023)

7.0 MECANISMOS DE REMUNERAÇÃO E VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA PARA UHRs NO BRASIL

De acordo com o serviço prestado e produto oferecido, a remuneração para as UHRs pode trazer alguma viabilidade econômico-financeira. Na Tabela 4, é possível identificar que a remuneração por arbitragem de preços no curto prazo, participação em leilões para fornecimento de energia elétrica apenas, e a receita obtida quando se considera a UHR apenas como um ativo de transmissão são produtos de baixa viabilidade econômica para as hidrelétricas reversíveis. Já no caso de remuneração pelos serviços ancilares, são produtos de média viabilidade econômica. No entanto, leilões específicos para contratação

de capacidade de potência ou específicos para a contratação de flexibilidade de potência trazem alta rentabilidade e viabilizariam economicamente novos projetos de UHRs no Brasil.

SERVIÇO	TIPO DE REMUNERAÇÃO	VIABILIDADE/RISCO
Fornecimento de energia elétrica		
Contratos de energia (ACR ou ACL)	Regulado: resultado do leilão Livre: valor negociado bilateral	Média viabilidade Produto não prioritário, mas com previsibilidade de receita. Apenas mais possibilidade para empilhamento de receita
Mercado de curto prazo	Arbitragem de preços limitado ao $PLD_{min} - PLD_{max,hr}$	Baixa viabilidade Mecanismo de remuneração com alta adesão em outros países, mas com relativa imprevisibilidade de receita. Incerteza quanto ao retorno do investimento, sem expectativa de receita fixa.
Serviços Ancilares		
Controle primário de frequência	Sem remuneração (é um requisito)	
Controle secundário de frequência*	CPSA, R\$ 64.483,22/ano	
Suporte de reativos sem fornecimento de potência ativa	CPSA, TSA = R\$ 9,02/MVar-h	
Suporte de reativos durante fornecimento de potência ativa	Sem remuneração (é um requisito)	Média viabilidade Desenvolvimento de um mercado de Serviços Ancilares e adequação regulatória para que uma UHR possa fornecer serviços semelhantes aos de uma UHE
Black start total*	CPSA, R\$ 48.362,40/ano	
Black start parcial*	Sem remuneração (é um requisito)	
Despacho complementar para manutenção de RPO**	Oferta de preços limitados a 130% do CVU mais recente	
*Agentes hidrelétricos		
** Agentes termelétricos		
SERVIÇO	TIPO DE REMUNERAÇÃO	VIABILIDADE/RISCO
Serviço de Capacidade		
Capacidade na forma de Energia	CER (disponibilidade), R\$/MWh em leilão competitivo (média LRCE/2022: R\$ 444,00/MWh)	Pouca viabilidade
Capacidade na forma de Potência	CRCAP (disponibilidade), preço em R\$/MW.ano em leilão competitivo, (média LRCAP/2021 R\$ 824.553,83/MW.ano)	Alta viabilidade LRCAP/2021 – apenas participação de fonte térmica LRCAP/2024 – participação das fontes térmicas e hídrlicas
Flexibilidade de Potência	Sem remuneração (ainda não existe um mercado definido)	Alta viabilidade Ainda cabe a criação de um ambiente de mercado específico
Função de transmissão		
Receita Anual Permitida - RAP	Taxa regulatória de remuneração do capital - transmissão = 11,45%**	Baixa viabilidade para UHR Apesar de haver maior previsibilidade de receita. Existe um entrave regulatório, pois para inibir possíveis distorções competitivas, houve a separação do ambiente competitivo (geração – investimento recuperado no mercado competitivo) do regulado (transmissão – investimento recuperado pelo modelo de custo por serviço ou receita permitida) Necessidade de adequação regulatória
* As ofertas consistem em produtos horários com duração de 4 (quatro) até 17 (dezesete) horas, lotes com volume mínimo 5 MW para cada hora de duração da oferta, discretizados no padrão de 1 MW, preço em R\$/MWh, dia da semana e identificação do Submercado da oferta, com aviso prévio no dia anterior ao despacho.		
** NOTA TÉCNICA Nº 55/2024-STR/ANEEL		

Tabela 4: Serviço prestado e viabilidade econômica para UHRs (Fonte: EPE, 2025)

8.0 CONCLUSÕES

A inserção das UHRs no sistema elétrico brasileiro pode se dar primeiramente pela elaboração e construção de um projeto piloto. Para o aproveitamento dos diversos atributos é necessária uma reavaliação do desenho de mercado, abrangendo tanto os aspectos regulatórios quanto a valoração adequada dos requisitos e a remuneração pelos serviços fornecidos. Esses aprimoramentos necessários devem ser realizados de forma cautelosa e conjunta sem onerar em demasia o consumidor final. Além disso, existe o desafio de aprimorar a gestão do recurso.

Sob o ponto de vista regulatório, é importante a criação de mercado competitivo para a negociação do produto capacidade de potência, assim como, novos mercados para a comercialização da oferta de flexibilidade de potência e serviços ancilares pelas UHRs, além da definição da outorga das UHRs, se concessão ou autorização. Em relação aos aspectos econômicos, deve-se dar atenção a competitividade frente a outras tecnologias, alocação adequada dos riscos e definição do modelo de negócio. Aspectos técnicos como levantamento de potencial, a grande variação nas características dos projetos, gestão do recurso por parte do operador e aprimoramento dos modelos energéticos de simulação merecem atenção, através de modelagem mais detalhada, de forma individualizada e com menor granularidade temporal, horária ou sub-horária.

9.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] EPE – Estudos de Inventário de Usinas Hidrelétricas Reversíveis: Metodologia e Resultados Preliminares para o Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.
- [2] EPE – Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR): Desafios para inserção em mercados de energia elétrica. Rio de Janeiro, 2021.
- [3] EPE – Caderno de Preços da Geração 2021. Rio de Janeiro, 2021.
- [4] EPE – Plano Decenal de Expansão 2031. Rio de Janeiro, 2021.
- [5] IHA – World Hydropower Outlook. 2023.
- [6] PNNL – Energy Storage Cost and Performance Database. 2020.
- [7] IRENA – Renewable Power Generation Costs in 2022.
- [8] SNPTEE – Experiência Internacional no Desenvolvimento de Usinas Hidrelétricas Reversíveis em mercados de eletricidade de países selecionados. 2022.
- [9] ANEEL – Consulta Pública nº 39/2023 – Análise Impacto Regulatório (AIR) nº 1/2023-SGM-SCE-STD-STE/ANEEL.
- [10] GESEL – A Viabilidade das Usinas Reversíveis no Sistema Interligado Nacional. 2021.
- [11] GESEL – Proposição de alternativas regulatórias para a viabilização comercial das Usinas Hidrelétricas Reversíveis. 2023.
- [12] GESEL – Remuneração de projetos de armazenamento de grande porte. 2023.
- [13] Manual de Inventário Hidrelétrico.

DADOS BIOGRÁFICOS



Ronaldo Antonio de Souza. Engenheiro Eletricista, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Mestrando em Planejamento Energético, PPE - COPPE, UFRJ. Engenheiro em FURNAS Centrais Elétricas, Departamento de Planejamento de Geração de Energia Elétrica. Período: 2002-2007. Analista de Pesquisa Energética na Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Diretoria de Estudos de Energia Elétrica. Período: 2007 até a presente data.

Caio Leocádio é engenheiro eletricista e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Atualmente trabalha como Consultor Técnico na Superintendência de Geração da EPE, atuando na coordenação técnica de estudos energéticos para o planejamento da expansão da geração e na análise técnica e econômica de empreendimentos hidrelétricos e termelétricos.

André Makishi é engenheiro mecânico graduado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e trabalha como analista na EPE desde 2015, atuando na Superintendência de Geração (SGR/DEE).

Patricia Asfor Parente possui graduação em Engenharia de Energias Renováveis pela Universidade Federal do Ceará (2015) e mestrado em Engenharia Mecânica na área de Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis pela Universidade Federal do Ceará (2018). Tem experiência na área de Engenharia de Energia, com ênfase em Energia Eólica e Energia Solar Fotovoltaica. Atualmente trabalha como Analista de Pesquisa Energética desenvolvendo estudos energéticos para o planejamento da expansão da geração.