

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

INCLUSÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS NOS ESTUDOS DE INVENTÁRIO HIDRELÉTRICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

IGOR PINHEIRO RAUPP(1); PRISCILLA DAFNE SHU CHAN(1); DANIELA DE SOUZA KYRILLOS(1); LUCIANO NOBREGA RODRIGUES XAVIER(1); FERNANDA DA SERRA COSTA(2); JORGE MACHADO DAMÁZIO
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA CEPEL(1); UERJ - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO(2)

RESUMO

O artigo tem como objetivo discutir as implicações da inclusão de usinas hidrelétricas reversíveis nos Estudos de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas. Tais implicações podem ser de fácil solução ou de maior complexidade. O artigo busca estimular a discussão, dentre outras, sobre a melhor maneira de considerar o benefício das UHR na tomada de decisão dos Estudos de Inventário, seja por alteração do cálculo do índice custo-benefício utilizado nos Estudos de Inventário ou pela criação de um novo critério referente ao armazenamento propiciado pelas usinas reversíveis na alternativa a qual está inserida.

PALAVRAS-CHAVE:

Usinas Hidrelétricas Reversíveis; Inventário Hidrelétrico.

1.0 INTRODUÇÃO

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2050 (1), nas próximas décadas, a expansão da fonte hídrica não conseguirá acompanhar o ritmo de crescimento da demanda por energia no Brasil, tendo como consequência a gradual perda de participação desta fonte na nossa matriz. No entanto, cada vez mais, os reservatórios das usinas hidrelétricas (UHEs) vêm ganhando relevância por conferirem elevada flexibilidade para a operação do sistema, principalmente num cenário de maior participação de fontes intermitentes, tais como eólica e solar, permitindo a utilização dos recursos renováveis de forma mais eficiente (2)(3), reduzindo a necessidade de acionamento de usinas térmicas, com consequente redução de emissões de gases de efeito estufa (4).

A necessidade de maior flexibilidade do sistema e o aumento de oferta de energia renovável não hidrelétrica nos períodos secos levarão a uma alteração no perfil sazonal de armazenamento dos reservatórios das UHEs. Atualmente, o volume de água excedente do período chuvoso é armazenado nos reservatórios para ser utilizado no período seco. Este cenário vem sendo alterado e no futuro, esta variação ocorrerá ao longo dos dias, em escala de horas ou minutos. A complementariedade sazonal das demais fontes renováveis faz com que haja um aumento da oferta de energia renovável não hidrelétrica nos períodos secos. Esse aumento reduz a necessidade de consumir os estoques de água nos períodos secos para evitar o consumo de combustíveis nas termelétricas, de forma que não se torna necessário reduzir tanto os níveis dos reservatórios no segundo semestre (1).

Neste contexto, verifica-se que as energias renováveis são melhor aproveitadas quando trabalham em conjunto com tecnologias de armazenamento de energia, pois contribuem para equilibrar a carga e regular a frequência, auxiliam a rede de distribuição a comportar melhor os picos de consumo, otimizando o desempenho econômico na manutenção e operação dos sistemas de geração. Quando integrados à rede de distribuição, os sistemas de armazenamento de energia realizam duas funções: como “carga”, quando acumulam energia elétrica, e como “gerador” durante os períodos em que fornecem eletricidade para a rede. A Figura 1 exemplifica este comportamento comparando a geração solar com um perfil exemplo de consumo. Em “A”, há um excedente de energia que poderia ser armazenado por alguma das tecnologias de armazenamento, para ser utilizado em “B”.

O Plano Decenal de Energia 2027 (5) já sinalizava a necessidade de tais tecnologias para atendimento à demanda máxima e à variação instantânea da carga no curto prazo. Segundo dados deste Plano, a necessidade de oferta para complementação de potência aparece a partir de 2022 e se intensifica a partir de 2023, totalizando cerca de 13200 MW em 2027, sendo consideradas tanto as tecnologias de armazenamento quanto térmicas para essa finalidade.

Nos Estados Unidos e União Europeia, os sistemas de armazenamento correspondem a 2% e 5% da capacidade instalada de geração, respectivamente.

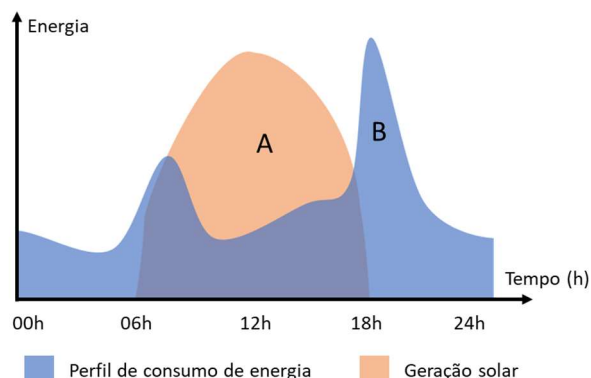


FIGURA 1: Geração solar versus perfil de consumo de energia.

A Figura 2 apresenta as diferentes tecnologias de armazenamento, que podem ser divididas em quatro categorias: mecânica, eletroquímica, química e elétrica. Segundo dados de 2020 da *International Hydropower Association* (6), a usina hidrelétrica reversível (UHR) (7) é a tecnologia de armazenamento mais madura e mais amplamente utilizada, representando 94% da capacidade instalada de armazenamento de energia no mundo. Atualmente, existem 158 GW de capacidade instalada de UHR no mundo e os três países que lideram este ranking são China, Japão e Estados Unidos, com 30 GW, 27 GW e 23 GW, respectivamente.

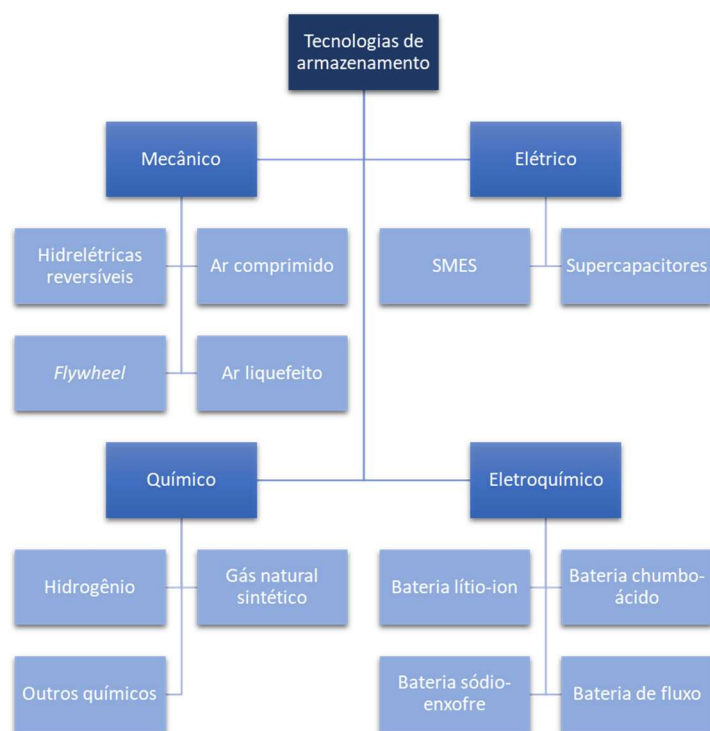


FIGURA 2: Tipos de tecnologias de armazenamento. Fonte: (8).

Este tipo de tecnologia funciona basicamente com dois reservatórios (um inferior e um superior). A água é bombeada do reservatório inferior para o superior, utilizando-se eletricidade nos momentos em que há sobra de geração no sistema e, portanto, a energia é mais barata. Nos momentos de falta de oferta no sistema, como os períodos de ponta de consumo ou baixa geração intermitente, a água é turbinada do reservatório superior para o inferior, re-injetando energia no sistema. Devido a sua capacidade de armazenamento e flexibilidade operativa, as UHRs fornecem uma série de funcionalidades e benefícios ao sistema associados à geração, transmissão e distribuição, conforme detalhado em EPE (9), tais como nivelamento de carga, provimento de inércia, reserva de potência, acompanhamento de carga, redução de ciclos de unidades termelétricas, redução da carga mínima do sistema e suporte à expansão da geração inflexível, controle de reativos, redução de congestionamento, perdas elétricas e

adiamento de investimento em novos ativos de transmissão e suporte à expansão da geração de energia com fontes renováveis e com baixos níveis de emissões de gases de efeito estufa. Os mapas da Figura 3 mostram, respectivamente, as UHRs em operação (em azul), em construção (em amarelo) e planejadas (em vermelho) ao redor do mundo, de acordo com os dados do *Hydropower Pumped Storage Tracking Tool* (10). Pela Figura 3, observa-se que boa parte das UHRs em operação (em azul no mapa) no mundo se encontram na China, Japão, Estados Unidos e em regiões montanhosas da Europa, favoráveis a inserção de UHRs, como Espanha, Áustria, França, Suíça, Alemanha e Itália. A grande maioria das UHRs em construção estão na China (em amarelo no mapa) e se planeja construir novas UHRs principalmente na Europa, China, Índia, Austrália e Estados Unidos (em vermelho).



FIGURA 3: UHRs em operação (em azul), em construção (em amarelo) e planejadas (em vermelho). Fonte: (10).

A predominância das UHEs na matriz elétrica brasileira e a integração das diferentes regiões do país através do Sistema Interligado Nacional (SIN) possibilitaram a postergação da implantação de UHR no Brasil. No entanto, a crescente participação das fontes não controláveis e a não expansão de hidrelétricas com reservatórios de regularização pode diminuir a capacidade do sistema de suprir os picos de demanda.

No Brasil, nas décadas de 1970 e 1980 foram realizados pré-inventário e inventário de UHR, identificando grande potencial, principalmente na região Sudeste (11-14). No entanto, devido aos desenvolvimentos tecnológico, mercadológico, socioambiental e regulatório das últimas décadas, é necessário reavaliar estes estudos. Em 2019, a EPE apresentou os resultados preliminares de um Estudo de Inventário exclusivo de UHR para o estado do Rio de Janeiro (15), cujos objetivos são mapear os locais favoráveis para implantação de UHR e identificar os mais promissores. No entanto, até o momento, não se discutia a inclusão de UHR em Estudos de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas, de modo a identificar, já nestes estudos, a possibilidade de consideração de UHR na divisão

de quedas selecionada e sua interação com a operação dos demais aproveitamentos da mesma cascata. Vale ressaltar que os Estudos de Inventário têm como objetivo estudar e analisar todas as possíveis alternativas de aproveitamento do potencial hidrelétrico de uma bacia hidrográfica e selecionar a melhor alternativa (16). Destaca-se também, conforme sinalizado por EPE (9), que a Lei nº 9074/1995 exige a definição de “aproveitamento ótimo” pelo poder concedente para que um aproveitamento hidrelétrico seja objeto de concessão mediante licitação. Sendo “aproveitamento ótimo”, todo potencial definido em sua concepção global pelo melhor eixo do barramento, arranjo físico geral, níveis de água operativos, reservatório e potência, integrante da alternativa escolhida para divisão de quedas de uma bacia hidrográfica nos Estudos de Inventário Hidrelétrica da bacia. Não havendo, no entanto, procedimento ou menção à UHR.

Identificada esta lacuna nos estudos de expansão do setor, este artigo tem como objetivo discutir as implicações da inclusão das UHR nos Estudos de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas. Tais implicações podem ser de fácil solução, como a inclusão de sítios de UHR na fase de identificação dos locais barráveis, como de maior complexidade, onde destaca-se o cálculo do Índice Custo-Benefício (ICB). O ICB, um dos critérios para a seleção da melhor alternativa de divisão de quedas do Inventário, é calculado a partir do benefício energético de cada alternativa, obtido por simulação da operação da alternativa considerando série de vazões mensais. No entanto, esta discretização é incompatível para representar a operação de uma UHR e seus benefícios. Diante disso, este artigo busca estimular a discussão sobre a melhor maneira de considerar o benefício das UHR na tomada de decisão dos Estudos de Inventário. Seja por alteração no cálculo do ICB ou por meio de um novo índice atrelado ou não ao impacto positivo da alternativa referente ao armazenamento propiciado pelas UHRs na alternativa a qual está inserida. O artigo está dividido em 3 itens, sendo este primeiro item a introdução e contextualização do assunto. O próximo item apresenta algumas características do já citado Estudo de Inventário de UHR para o estado do Rio de Janeiro elaborado pela EPE (15) e o item seguinte detalha melhor as questões mais relevantes identificadas até o momento quanto à inclusão de UHR nos Estudos de Inventário, com foco principal na consideração do benefício energético.

2.0. ESTUDO DE INVENTÁRIO ESPECÍFICO DE USINA HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL

O ciclo de implantação de uma UHE abrange as seguintes etapas: Estudo de Inventário, Viabilidade, Projeto Básico, Projeto Executivo/construção e operação. Conforme EPE (15), apesar de ainda não haver regulamentação específica, os Estudos de Inventário de UHR constituem a etapa inicial de uma sequência de estudos necessários para subsidiar os estudos de planejamento da expansão do sistema elétrico para inserção das UHRs no SIN. Ainda de acordo com EPE (15), entende-se que o ciclo de implantação das UHRs deve seguir uma sequência de estudos que possibilite o melhor aproveitamento do potencial local, sincronização com o planejamento do setor elétrico e a definição da melhor solução técnica, econômica e socioambiental, considerando a intrínseca multidisciplinariedade e complexidade associadas ao projeto de empreendimentos hidrelétricos. Dessa forma, já existe uma sinalização por parte da EPE de que as UHRs, assim como as UHEs, seguirão as etapas do ciclo de implantação, começando pelo Estudo de Inventário até sua construção e operação.

Conforme dito anteriormente, o Estudo de Inventário de UHR elaborado pela EPE tem como objetivos mapear os locais favoráveis para implantação de UHR e identificar os mais promissores, considerando aspectos topográficos, socioambientais, geológicos, hidrológicos, tecnológicos e econômicos, com vistas à hierarquização dos aproveitamentos para o desenvolvimento de estudos posteriores com maior grau de detalhamento, isto é, viabilidade, projeto básico, etc. Este estudo foi o primeiro, com aplicação no estado do Rio de Janeiro, com previsão de realização para outros estados.

Como premissa, estes Estudos de Inventário serão desenvolvidos em duas fases, semelhante aos Estudos de Inventário de UHEs. A primeira fase, também denominada Estudos Preliminares, é realizada integralmente em escritório com dados secundários. São identificados os locais que apresentam características topográficas favoráveis e são selecionados aqueles com maior atratividade econômica. São elaborados estudos básicos de arranjo, de avaliação de impactos, custos de implantação nos moldes do orçamento padrão Eletrobras (OPE), visando hierarquizar os aproveitamentos, nos mesmos moldes dos Estudos de Inventário de UHEs. Na fase seguinte, também denominada Estudos Finais, são realizados estudos complementares mais detalhados dos aproveitamentos pré-selecionados nos Estudos Preliminares, considerando informações obtidas por levantamentos de campo, com o objetivo de uma melhor caracterização dos aproveitamentos sob o ponto de vista técnico, econômico e socioambiental.

Neste estudo foram considerados apenas reservatórios novos, uma vez que a utilização de reservatórios existentes requer tratamento específico relacionado ao compartilhamento da água entre os reservatórios e identificação de restrições. De acordo com a metodologia utilizada, primeiro eram identificadas as áreas elevadas com topo suave para localização do reservatório superior, para posterior identificação da possibilidade de ter um reservatório inferior, respeitando limites de distância, desnível mínimo e localização de cursos d'água. Foi utilizada a premissa de tempo de geração das UHR de 3 horas na potência máxima. O estudo obteve como resultado 23 UHRs, sendo que 15 apresentam condições socioambientais mais favoráveis.

3.0. ESTUDOS DE INVENTÁRIO ENGLOBANDO USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS E CONVENCIONAIS

Neste item, são apresentados e discutidos os principais desafios identificados para inserção de UHR em estudos de Inventário de UHEs.

3.1. Identificação de locais barráveis

Uma das primeiras etapas dos Estudos de Inventário é a identificação de locais barráveis, visto que a partir destes locais e considerando suas limitações impostas por condicionantes físicas e restrições socioambientais, serão definidos os possíveis projetos que servirão de base para a formulação das alternativas de divisão de quedas (Figura 4). Estes possíveis locais barráveis devem ser identificados principalmente a partir de mapas planialtimétricos, junto com fotografias aéreas e imagens obtidas por sensoriamento remoto. De acordo com o Manual de Inventário (16), em uma primeira identificação, devem ser observados, com especial interesse, todos os trechos em corredeiras e quedas de água, além de todos os locais que apresentem estreitamentos acentuados do vale. Estes locais devem ser caracterizados em plantas e perfis dos rios. A partir destes dados é elaborado o Plano de Reconhecimento de Campo, com o objetivo principal de confirmar, incluir e/ou excluir possíveis locais barráveis, bem como, as restrições levantadas.

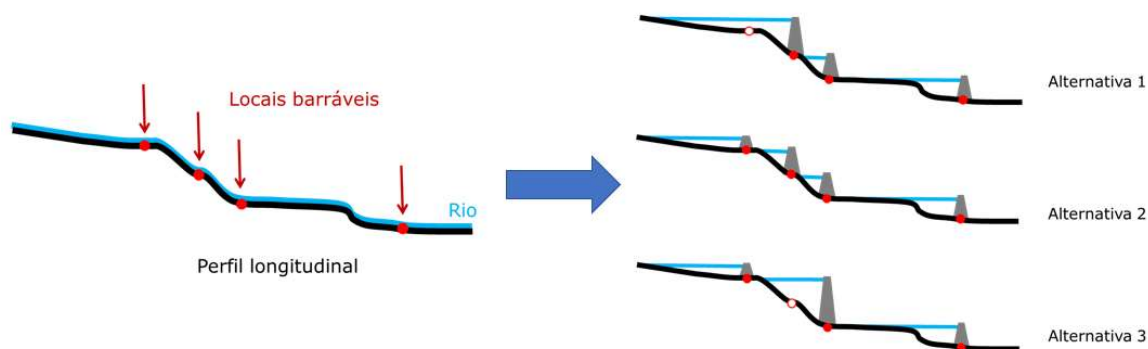


FIGURA 4: Esquema de identificação de locais barráveis e formulação de alternativas de divisão de quedas.

Em se tratando de UHRs, deveria ter uma premissa, durante a identificação de locais barráveis, de procurar “sempre” por locais com a possibilidade de ter reservatórios superiores ou identificar os locais barráveis de UHEs convencionais e depois verificar a possibilidade destas usinas terem um reservatório superior e, assim, serem uma UHR? Na primeira opção, existe uma busca direta por UHR. Já na segunda opção, verifica-se tal possibilidade após uma primeira identificação de locais sem um propósito de se configurar uma UHR. Seria possível ainda, uma terceira opção, buscando identificar simultaneamente locais barráveis com boas quedas para UHE, mas no mesmo levantamento, buscar locais com a possibilidade de reservatórios superiores. Nesta opção, poderia ocorrer inclusive conflitos, dado que um local barrável de UHE poderia inviabilizar uma UHR e vice-versa. O estudo indicaria a melhor configuração. Em EPE (15), primeiro foram identificados locais elevados com topo suave para possível localização de reservatório superior e, posteriormente, a partir da indicação destes reservatórios, foram identificados possíveis locais para os reservatórios inferiores, respeitando as premissas de desnível e distância em planta entre os reservatórios superior e inferior.

3.2. Consideração do benefício energético da Usina Hidrelétrica Reversível

Nos Estudos de Inventário, o benefício econômico-energético da alternativa é avaliado em termos de um Índice custo-benefício (ICB), que é um dos critérios para a tomada de decisão quanto a escolha da melhor alternativa de divisão de quedas. Este índice é calculado como a razão entre o custo total da alternativa (custo de construção, operação e manutenção dos projetos) e o seu benefício energético (energia firme), obtido por simulação da operação do conjunto de projetos da alternativa ao longo do período crítico do sistema interligado nacional (SIN), com discretização mensal.

Com relação ao benefício energético, no caso das UHRs, a simulação da operação da alternativa teria que ser diária ou horária (e não mensal), para conseguir representar a operação de uma UHR, e assim capturar o seu benefício de armazenamento de energia para atendimento ao período de maior carga do sistema (ponta do sistema), exceto o caso das UHRs sazonais (17). Como visto em EPE (15), o tempo de operação da UHR considerado foi de 3 horas. Isto implicaria na necessidade de informar séries de vazões diárias/horárias aos aproveitamentos e realizar a

simulação da operação horária/diária ao longo do período crítico. Tal discretização da série de vazões é incompatível com o grau de detalhamento exigido nos Estudos de Inventário. Além disso, as UHRs consomem mais energia do que geram (em geral, possuem uma eficiência entre 70% e 85%), sendo seu maior benefício, o consumo de energia em momentos de energia mais barata para gerar em momentos de energia mais cara. Desta maneira, a consideração da UHR por este índice pode até, em último caso, vir a inviabilizar a alternativa.

Conforme destacam Galhardo (18) e Canales et al. (19), o principal desafio das UHR no Brasil é a busca por sua viabilidade comercial, uma vez que de acordo com as regras atuais, os ativos de geração são recompensados pela energia que o empreendimento garante entregar ao sistema. O cálculo do ICB nos Estudos de Inventário segue esta mesma lógica, mas associado ao custo da alternativa. Diversos estudos relacionados a UHRs não fazem uma proposta explícita de como considerar os ganhos destas usinas, principalmente quando estas são consideradas em conjunto com UHEs. Hunt et al. (17) mostraram o benefício energético em termos de energia gerada de uma UHR sazonal a montante do rio Iguaçu, que se mostrou viável devido ao ganho de energia na cascata da bacia ao longo de um ano. Neste caso, haveria uma perda de geração de 4,3GW no período úmido para enchimento da UHR sazonal, e um aumento de 4,8GW na energia gerada no período seco, devido a geração de 1,5GW da UHR e um ganho de 3,3GW na cascata. Porém o estudo não comparou os custos das alternativas (com e sem a UHR) para mostrar sua viabilidade, como seria feito em um Estudo de Inventário. Canales (20) conseguiu avaliar a efetividade de utilização de UHR através da simulação horária de sistema híbrido ao longo de um ano, onde a UHR foi considerada como dispositivo de armazenamento de um parque eólico. Neste caso, foi observado que a UHR permite diminuir o desperdício de energia renovável, o uso de termelétricas e, assim, diminuir os custos de geração do sistema.

Dado que o atual método de cálculo do ICB não permite considerar corretamente UHRs, de que forma o benefício energético (associado ao armazenamento de energia) das UHRs poderia ser considerado na tomada de decisão dos Estudos de Inventário? Num primeiro momento, duas opções são vislumbradas. A primeira é a simulação da operação energética da alternativa considerar a geração na ponta e fora da ponta, que atualmente não é considerado nos Estudos de Inventário. Isso permitiria representar o atendimento à ponta feito pelas UHRs. Porém, para isso, seria necessário simular todo o SIN considerando um parque hidrotérmico de longo prazo, incluindo as fontes eólicas e solar, compatível com o horizonte do Inventário. O que mais uma vez exigiria um detalhamento ainda maior do que o que é feito nestes estudos. Ainda considerando esta opção, com relação ao custo total da alternativa, é relevante avaliar de que maneira o custo da UHR deveria ser considerado. Admitindo-se duas alternativas (A e B), cuja “única” diferença entre elas, seja a presença de um reservatório superior em um dos projetos (projeto X) da alternativa B (UHR). Na comparação das duas alternativas, a alternativa B deveria ser “vencedora”? Se sim, vai existir uma diferença de custo do projeto X, isto é, ele vai ser mais caro na alternativa B do que na A. Este custo estaria realmente associado ao projeto X? Ou poderia estar associado ao benefício de armazenamento? O reservatório superior do projeto X poderia ser considerado como uma outra tecnologia?

Uma segunda possibilidade seria considerar o armazenamento das UHRs como mais um benefício no já existente Índice de Impacto Socioambiental Positivo (IAP), que também é um dos critérios para selecionar a melhor alternativa no Inventário. Atualmente, o IAP engloba os benefícios: dinamização do mercado de trabalho local, melhoria da infraestrutura rodoviária, aumento da arrecadação municipal e uso eficiente dos recursos hídricos. Caso esta seja a opção escolhida, deveria ser considerado também o armazenamento de água (e, consequentemente, de energia) dos reservatórios de regularização das UHEs como benefício neste índice? O inconveniente desta proposta é a junção em um mesmo índice de impactos positivos socioeconômicos com o benefício energético, que dentre outras consequências, pode dificultar tanto a definição da importância (peso) de cada benefício que irá compor o novo índice IAP, quanto a definição do peso deste critério frente aos demais. Principalmente porque os demais critérios são um explicitamente econômico-energético (ICB) e outro explicitamente socioambiental (Impacto Socioambiental Negativo).

Apesar destas possibilidades, segundo EPE (9) e Castro et al. (21), o desenvolvimento de UHR requer uma atualização do arcabouço regulatório, dada à inabilidade dos desenhos de mercado em valorar e compensar os múltiplos benefícios desta tecnologia para o sistema interligado. Em Castro et al. (22) foi feito um levantamento das formas de remuneração de UHR no mundo e identificou que as principais são: venda de energia, arbitragem entre os preços ao longo do tempo, prestação de serviços ancilares, armazenamento no nível da transmissão e disponibilização de potência firme ao sistema.

No Brasil, a comercialização de energia das UHEs é realizada por quantidade de energia que o gerador se compromete a entregar nos termos de garantia física (23), que se baseia na geração de energia da usina, não sendo valorizada explicitamente a potência disponibilizada ao sistema. A regulação atual já prevê a existência da garantia física de potência, mas até então, na prática este atributo ainda não foi valorado no mercado (21). Porém, de acordo com EPE (9), este panorama vem mudando com a transformação e modernização do setor elétrico brasileiro, conforme os resultados das consultas públicas do Ministério de Minas e Energia (MME) nº 32/2017 (24) e 33/2017 (25) e portaria do MME nº 187/2019 (26), onde se prevê a separação de lastro e energia, o que pode permitir a remuneração de tecnologias por lastro de potência. Esta separação tem o intuito de desvincular o produto energia,

que é a efetiva geração de eletricidade de uma usina, do produto lastro, ou seja, da garantia de confiabilidade. Mais recentemente, uma portaria normativa do MME (27), estabeleceu diretrizes para a realização de leilão para contratação de potência elétrica e de energia associada, que acrescentem potência elétrica ao SIN. Assim, no leilão de reserva de capacidade previsto para ser realizado em dezembro de 2021, serão negociados produtos de potência, em que o compromisso de entrega consiste em disponibilidade de potência. De acordo com Castro et al. (21), isto já existe em diversos mercados mundiais, como nos Estados Unidos e Reino Unido, onde o agente é remunerado por fornecer potência ao sistema quando necessário. A potência é, então, comercializada como um produto de confiabilidade, separado da comercialização da energia. Ainda conforme Castro et al. (21), o agente que vende potência também vende, em paralelo, energia, de forma que o gerador convencional tem duas fontes de receita. Apesar da portaria explicitar que se trata de usinas termelétricas, o mesmo caminho pode ser considerado para as UHRs, vislumbrando-se, assim, uma terceira opção de consideração do benefício da UHR nos Estudos de Inventário. Isto é, considerar o benefício de disponibilidade de potência como mais um critério, porém diferentemente da opção anterior, não associado ao índice IAP. E do mesmo modo, as alternativas seriam avaliadas em termos da energia gerada, pelo índice ICB já existente, e em termos da disponibilidade de potência, a partir de um novo índice proposto.

Definida uma metodologia para cálculo da potência disponibilizada, seria então calculado um índice adicional para tomada de decisão dos Estudos de Inventário. Este novo índice poderia considerar também o custo dos projetos ou ser simplesmente a potência disponibilizada pela alternativa. Assim, retomando ao exemplo das alternativas A e B (idênticas com exceção de uma UHR na alternativa B), a alternativa que tivesse uma UHR (alternativa B) teria o índice associado a potência disponível com uma melhor nota em relação à alternativa sem UHR (alternativa A) que, possivelmente, disponibilizaria menos potência. Deste modo, a tomada de decisão dos Estudos de Inventário ficaria com quatro critérios: minimização do índice custo-benefício, minimização do impacto socioambiental negativo, maximização do impacto socioambiental positivo e maximização da potência disponível.

Extrapolando a discussão para consideração de mais um critério na tomada de decisão dos Estudos de Inventário, seria relevante a revisão do método multicritério de escolha da melhor alternativa. Atualmente, utiliza-se o método da soma ponderada, porém, com o aumento do número de critérios, a definição dos pesos entre os critérios, que é determinante neste método, torna-se uma tarefa ainda mais complexa. Raupp et al. (28)(29) mostraram que outros métodos multicritério que não demandam informações tão precisas quanto a importância entre os critérios são proeminentes e mereceriam uma maior atenção.

4.0. CONCLUSÕES

As UHRs são uma eficiente opção de tecnologia de armazenamento para sistemas, como o do Brasil, com crescente participação de fontes intermitentes e gradual perda de participação da fonte hidrelétrica. Conforme visto, as UHRs propiciam uma série de serviços ao sistema ao qual é inserido, porém no Brasil, o arcabouço regulatório ainda não permite a adequada remuneração destes serviços, e incentivo à construção destas usinas. Do mesmo modo, a metodologia de seleção da melhor alternativa de divisão de quedas dos Estudos de Inventário Hidrelétrico, também não consegue explicitar os benefícios das UHRs, podendo inclusive, inviabilizar a alternativa na qual está inserida.

Neste artigo foram levantadas algumas questões quanto a inclusão de UHRs nos Estudos de Inventário, que merecem atenção e uma maior discussão, com o intuito de começar as discussões acerca deste assunto. Considera-se relevante a consideração de UHRs nos Estudos de Inventário Hidrelétrico, de modo a estudar as alternativas de aproveitamento do potencial hidrelétrico da bacia levando em conta, também, a tecnologia de UHR. Estudos mostram que a inclusão de UHR em bacias com UHEs em cascata já construídas podem alterar a operação dos reservatórios (30), de modo que a concepção da operação conjunta desde a etapa de planejamento seria a melhor alternativa.

O ponto principal quanto a inclusão de UHRs nos Estudos de Inventário refere-se ao cálculo do benefício energético das alternativas, representado pelo índice custo-benefício (ICB), que é um dos principais critérios para a tomada de decisão, junto com o impacto socioambiental negativo. A metodologia de cálculo do ICB considera apenas a energia gerada pela alternativa ao longo do período crítico, considerando a simulação da operação da alternativa com uma discretização mensal. Esta discretização não é adequada para representar a operação de uma UHR. Conforme discutido no item 3 do artigo, a opção mais favorável para quantificar o benefício da UHR seria considerar um critério adicional na tomada de decisão dos Estudos de Inventário de modo a representar a disponibilidade de potência. Assim, nos Estudos de Inventário que englobariam UHEs e UHRs, as alternativas seriam avaliadas considerando quatro critérios, os já existentes minimização do índice custo-benefício, minimização do impacto socioambiental negativo e maximização do impacto socioambiental positivo e o critério adicional de maximização da potência disponível.

É importante pontuar que neste artigo não foram abordadas as questões referentes aos impactos socioambientais das UHRs, visto que a metodologia de avaliação dos impactos nos Estudos de Inventário, que divide o sistema ambiental em 6 temas específicos (ecossistemas aquáticos, ecossistemas terrestres, modos de vida, organização territorial, base econômica e Populações indígenas/Tradicionais) já contemplariam os impactos adicionais deste tipo de tecnologia.

Por fim, salienta-se que o objetivo deste artigo é estimular a discussão acerca da inclusão de UHRs nos Estudos de Inventário Hidrelétrico e que as proposições apresentadas preliminarmente neste artigo carecem de uma discussão mais ampla dentro do setor, para melhor amadurecimento. Não obstante, as possíveis alterações a serem consideradas na metodologia de Inventário culminaria na necessidade de revisão do Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas.

5.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EPE/MME (2020). Plano Nacional de Energia 2050 – versão para consulta pública. Brasília.
- (2) MACHADO, P., RAMOS, D., TENAGLIA, G., HUNT, J. (2017). Reducing Intermittence of Renewable energy Sources with Seasonal-Pumped-Storage Plants. *Plants. Energy and Power Engineering*, 9, pp. 273-292.
- (3) DENHOLM, P.; ELA, E.; KIRBY, B.; MILLIGAN, M. (2010). The role of energy storage with renewable electricity generation: Technical Report. Colorado: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A2-47187.
- (4) ARBABZADEH, M., SIOSHANSI, R., JOHNSON, J.X. et al. (2019) The role of energy storage in deep decarbonization of electricity production. *Nature Communications* 10, 3413.
- (5) EPE/MME (2018). Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. Rio de Janeiro.
- (6) IHA (2020). Hydropower Status Report 2020 – Sector trends and insights.
- (7) VENNEMANN, P., GRUBER, K., HAAHEIM, J., KUNSCH, A. (2011). Pumped storage plants - Status and perspectives. Essen: VGB PowerTech.
- (8) ANEEL (2020). Abertura de Tomada de Subsídios para inserção de sistemas de armazenamento, incluindo usinas reversíveis, no Sistema Interligado Nacional. Nota Técnica nº 094/2020-SRG/ANEEL
- (9) EPE (2021). Usinas Hidrelétricas Reversíveis: Desafios para inserção em Mercados de Energia Elétrica. Nota Técnica EPE/DEE/SEG/013/2021.
- (10) IHA (2021). Hydropower Pumped Storage Tracking Tool. Disponível em: <https://www.hydropower.org/hydropower-pumped-storage-tool>. Acessado em: fevereiro 2021
- (11) SOARES, L. (1974). Estudo preliminar das condições de implantação de usinas reversíveis junto à Grande São Paulo. Relatório de pesquisa.
- (12) SOARES, L. (1979). Inventário para Usinas Hidrelétricas Reversíveis-UHR junto às Serras Geral e da Mantiqueira - São Paulo - Fase de Pré-Inventário. Relatório de pesquisa.
- (13) SOARES, L. (1981). Inventário de usinas hidrelétricas reversíveis junto à Serra do Mar no Estado de São Paulo - Fase Pré-Inventário. Relatório de pesquisa.
- (14) Eletrobras (1994). Plano Nacional de Energia Elétrica 1993-2015: Plano 2015. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas do Brasil.
- (15) EPE (2019). Estudos de Inventário de Usinas Hidrelétricas Reversíveis – Metodologia e Resultados Preliminares para o Estado do Rio de Janeiro. EPE-DEE-NT-006/2019-r0.
- (16) MME (2007). Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas.
- (17) HUNT, J., FREITAS, M. (2016). Usinas Hidrelétricas Reversíveis Sazonais e seus Benefícios para o Setor Elétrico Brasileiro. II Congresso Iberoamericano de Empreendedorismo, Energia, Meio Ambiente e Tecnologia.
- (18) GALHARDO, C.R. (2012). Os desafios para implantação de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. *PCH notícias e SHP News*, nº 55.
- (19) CANALES, F., BELUCO, A., MENDES, C. (2015). Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, vol. 19, nº2, pp. 1230-1249.
- (20) CANALES, F. (2015). Simulação e dimensionamento ótimo de sistemas autônomos híbridos com reservatórios hidrelétricos. Tese de doutorado Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande Sul.
- (21) CASTRO, N., BRANDÃO, R., CHAVES, A.C., VIEIRA, C., MASSENO, L., HUNT, J., CAMPOS, T. (2020). Usinas Hidrelétricas Reversíveis – Análise do Modelo Regulatório Brasileiro. Disponível em: https://projetouhr.com.br/assets/rts/Relat%C3%B3rio%20Regula%C3%A7%C3%A3o_1119.pdf
- (22) CASTRO, N., BRANDÃO, R., CHAVES, A.C., VIEIRA, C., VARDIERO, P., HUNT, J., CAMPOS, T. (2019). Os modelos Regulatórios de Usinas Hidrelétricas Reversíveis – Experiências Internacionais. Disponível em: https://projetouhr.com.br/assets/rts/Relat%C3%B3rio%207_revBMC.pdf

- (23) MME (2008). Portaria nº 268, de 12/08/2008. Brasília.
- (24) MME (2017a). Consulta pública nº 32, de 03/07/2017. Princípios para Atuação Governamental no setor elétrico. Brasília
- (25) MME (2017b). Consulta pública nº 33, de 05/07/2017. Aprimoramento do marco legal do setor elétrico. Brasília
- (26) MME (2019). Portaria nº 187, de 04/04/2019. Grupo de Trabalho de Modernização do Setor Elétrico. Brasília.
- (27) MME (2021). Portaria normativa nº 20/GM/MME, de 16/08/2021. Brasília.
- (28) RAUPP, I., COSTA, F., DAMÁZIO, J., CLIMACO, J., MIGUEZ, M. (2018). Seleção Multicritério de Alternativa de Localização de Reservatórios e Usinas Hidroelétricas em Bacias Hidrográficas considerando Parâmetros de Indiferença e Preferência. Cadernos do IME - Série estatística, v. 43, pp. 1-17.
- (29) RAUPP I., CLÍMACO J., COSTA F., MIGUEZ M. (2021) Multicriteria Methods and the Hydropower Plants Planning in Brazil. In: Multiple Criteria Decision Making. MCDM 2019. Contributions to Management Science. Springer, Cham.
- (30) HUNT, J., FREITAS, M., PEREIRA JR, A. (2017). A review of seasonal pumped-storage combined with dams in cascade in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews 70, pp. 385-398.

DADOS BIOGRÁFICOS



Doutor e mestre em Engenharia civil pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ, 2019 e 2008) e Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ, 2004). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), atuando principalmente nos seguintes temas: planejamento da expansão de sistemas hidrotérmicos, aproveitamentos hidroelétricos, operação de sistemas hidroelétricos, controle de cheias, inventário hidroelétrico, inclusão da avaliação de impactos ambientais na expansão da matriz, índice de vulnerabilidade e métodos multicritério.

(2) PRISCILLA DAFNE SHU CHAN
Engenheira civil com ênfase em recursos hídricos e meio ambiente formada pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2013). Mestre em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ na área de recursos hídricos e meio ambiente (2020). Atualmente, é pesquisadora no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobras-CEPEL), atuando nos projetos de controle de cheias, estudos de inventário hidroelétrico (SINV) e indicadores para gestão de sustentabilidade empresarial da Eletrobras (IGS).

(3) JORGE MACHADO DAMÁZIO
J.M. Damazio tem graduação em Engenharia Civil pela UFRJ (1977), mestrado em (1980) e doutorado (1977) em Engenharia Civil pela COPPE / UFJ. Desde 1977 é pesquisador do CEPEL, onde atua em inventário hidroelétrico, otimização da expansão e da operação de sistemas elétricos, séries temporais hidrológicas, operação para controle de cheias, mitigação de impactos ambientais, emissões de gases de efeito estufa e adaptação/resiliência às mudanças climáticas de hidroelétricas. Desde 2000 é professor do Instituto de Matemática da UERJ onde leciona Tópicos Especiais em Métodos de Decisão e Processos Industriais e Modelos de Regressão Linear no Departamento de Estatística.

(4) DANIELA DE SOUZA KYRILLOS
Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (1994), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (2000) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2006). É pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobras Cepel) desde 2002 até hoje e trabalhou como funcionária cedida na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF entre 2010 e 2017. Tem experiência na área de Recursos Hídricos, com ênfase em Planejamento Integrado dos Recursos Hídricos, atuando nos temas: programação linear, controle de cheias, operação de reservatórios e sistemas de apoio à decisão.

(5) LUCIANO NOBREGA RODRIGUES XAVIER
Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro(1998), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro(2002), doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro(2012) e pós-doutorado pela National Center for Atmospheric Research (2016). Desde 2002 é Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia Hidráulica.

(6) FERNANDA DA SERRA COSTA
Possui graduação em Engenharia Civil pela UFRJ, mestrado e doutorado em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ. Entre 1987 a 2020 foi Pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel. Atualmente é Professora do Instituto de Matemática e Estatística da UERJ e Especialista em Estudos Energéticos no ONS - Operador Nacional do Sistema Nacional, na área de Programação da Operação. Tem experiência na área de Probabilidade e Estatística, atuando principalmente nos seguintes temas: planejamento da expansão, planejamento e programação da operação de sistemas hidrotérmicos, aproveitamentos hidroelétricos, operação de sistemas hidroelétricos, controle de cheias, inventário hidroelétrico e séries temporais.