

PROPOSTA METODOLÓGICA DE PROSPECÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS COM O USO DE DADOS SECUNDÁRIOS E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Afonso Henriques Moreira Santos¹
Marlene Nazaré Ribeiro²
Túlio Meloni Virgílio²
Geraldo Lúcio Tiago Filho¹

¹*Universidade Federal de Itajubá*

²*X Estudos e Projetos*

DOI: 10.47168/rbe.v28i4.766

RESUMO

A usina hidrelétrica reversível (UHR) tem sido usada tanto para reduzir o pico de carga quanto para arbitragem no mercado de energia, com base nos preços. No entanto, as UHRs possuem potencialidades para diferentes aplicações do sistema elétrico moderno, como regularização de intermitência na geração renovável e prestação de serviços elétricos e ancilares, como regulação rápida da frequência. As UHRs podem ser instaladas em amplas possibilidades de locais, diferentemente das usinas hidrelétricas comuns, que estão vinculadas a potenciais hidrelétricos naturais. Assim, neste artigo, desenvolve-se uma estratégia de prospecção de locais potencialmente propícios à instalação de UHRs que atendam uma determinada demanda de serviço do sistema elétrico regional, utilizando Sistemas de Informação Geográfica (SIG), com base em critérios técnicos, que permite facilmente procurar alternativas viáveis numa região geoelétrica. Os estudos elétricos devem definir os serviços demandados e a capacidade de armazenamento e energia necessária (ou tempo de descarga). Com base nisso, o volume de armazenamento pode ser calculado, para diferentes quedas, sendo este parâmetro essencial na busca proposta. Restrições socioambientais e características técnicas adequadas levam a reduzir o espaço de alternativas, facilitando estudos aprofundados em uma segunda etapa. Por fim, é construído um conjunto de alternativas atrativas com base em critérios qualitativos para estudos mais aprofundados em uma segunda fase.

Palavras-chave: Usina Reversível; Armazenamento de Energia; Prospecção de Usina Reversível; SIG; Energia Renovável Intermitente.

ABSTRACT

The pumped hydropower energy storage plant (PHES or PSP) has been both used to shave power peak and arbitrage on the power market, based on prices. However, the PSP has additional capabilities for different modern power system applications, such as regularization of intermittency in renewable generation and provision of electrical and ancillary services, such as fast frequency regulation. PSP can be placed on a wide site possibilities, differently of ordinary hydro power plants. Thus, in this paper a strategy of screening potential sites for PSP is developed, using Geographic Information Systems (GIS), based on technical criteria that allow to easily search for viable alternatives in a geoelectric region. Electrical studies must define the demanded services and the necessary energy storage and power capacity (or discharge time). Based on that, the storage volume can be calculated, for different heads. Socio-environmental constraints and adequate technical characteristics lead to reduce the space of alternatives, facilitating in-depth studies in a second step. Finally, a set of attractive sites is built based on quali-quantitative criteria for further studies in a second phase.

Keywords: Pumped hydro; Energy Storage; PHES; PSP; GIS Site Selection; Variable Renewable Generation.

1. INTRODUÇÃO

A usina hidrelétrica reversível (UHR) é uma opção de empreendimento de armazenamento de energia hidráulica, na qual seu ciclo operacional pode ser diário, semanal, mensal ou sazonal, em função de sua aplicação na rede elétrica. O arranjo de uma UHR aproveita grandes desníveis no terreno, sendo compreendido, resumidamente, de um reservatório de montante, um sistema de adução, casa de máquinas reversíveis e reservatório de jusante, podendo ser concebido, principalmente, de duas formas: ciclo fechado, no qual a UHR trabalha fora de um curso d'água, operando como um sistema independente (SCHREIBER, 1978); ciclo aberto, que pode ser subdividido em parcialmente aberto, no qual a UHR compartilha um de seus reservatórios com uma UHE convencional planejada/existente; ou totalmente aberto, no qual a UHR é construída ligada diretamente a um curso natural de água, o qual é utilizado como reservatório superior ou inferior (LU et al., 2018).

Tradicionalmente, a tecnologia de uma Usina Hidrelétrica Reversível (UHR) aproveita as oportunidades que surgem com a variação de preço ou custo da tarifa elétrica, consumindo energia para bombear nos momentos de valores mais baixos, e turbinar gerando

energia nos intervalos de valores mais altos (AHMED et al., 2021). No entanto, tem-se tornado cada vez mais comum empreendimentos de UHRs para demais aplicações energéticas, como regularização da intermitência na geração renovável e na prestação de serviços elétricos e ancilares, como a regularização de frequência, frente a tendência de entrada de fontes renováveis intermitentes (LU et al., 2018).

As possibilidades de uso das UHRs ampliam-se à medida que ela pode ser instalada em variados locais, independentemente de potenciais hidrelétricos naturais. No entanto, esta ampla gama de possibilidades exige ferramentas e procedimentos que permitam uma seleção prévia dos locais mais favoráveis, direcionando os estudos mais aprofundados aos sítios potencialmente atrativos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na sequência são apresentadas algumas metodologias já desenvolvidas para prospecção de alternativas de UHRs. Elas envolvem a utilização de *softwares* e ferramentas de sistemas de informações geográficas (SIG), como por exemplo ArcGIS e QGIS, bem como Modelos Digitais de Elevação ou de Terreno com resoluções digitais mínimas de 30 m. Também levam em consideração os diferentes tipos de arranjos e ciclos de UHR.

A metodologia de Brasil (2019), propõe a prospecção de UHR por meio de uma ferramenta chamada GeoUHR, desenvolvida pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que foi aplicada para o estado do Rio de Janeiro. Para tanto, este trabalho considera como premissas a concepção de um novo reservatório superior e a utilização de um curso natural de água como reservatório inferior. Além disso, como diretrizes são adotadas: a busca por regiões elevadas que se distanciam em, no máximo, 5 km de um curso da água natural, com queda de pelo menos 100 m, de modo que a relação entre distância e queda (d/h) seja inferior a 10. Além disso, considera a exclusão das áreas impeditivas logo no início da metodologia.

Por sua vez, a metodologia de Ahmed et al. (2021) propõe a seleção de sítios próximos a grandes rios, ou do oceano, para serem utilizados como reservatórios inferiores. Com aplicação no Egito, este trabalho envolve critérios técnicos e geométricos que estabelecem quedas mínimas de 200 m entre as áreas superiores e o nível do mar, em que as alternativas com maiores quedas e mais próximas às fontes de água serão mais econômicas, dada a relação d/h. O autor também define como distâncias aceitáveis no máximo 10 km entre a UHR e a rodovia mais próxima, bem como no máximo 20 km até as linhas de transmissão mais próximas.

Já a metodologia de Haas et al. (2021), aplicada no Chile, parte da premissa da implementação da UHR em quatro possíveis ar-

ranjos: 1) Conexão entre um par de reservatórios existentes por meio de um conduto forçado, conjunto bomba-turbina e uma casa de máquinas; 2) Construção de um novo reservatório nas proximidades de um reservatório já existente; 3) Utilização do oceano como reservatório inferior e; 4) Construção de um novo reservatório perto de um curso d'água natural. Para o primeiro arranjo, os pares que apresentam uma distância máxima de 20 km e queda mínima de 150 m são destacados. Para o segundo caso, a metodologia prospecta pelos três demais arranjos simultaneamente, em que são levantados os reservatórios existentes, rios (perenes) e oceanos que se encontram a uma distância máxima de 40 km e uma queda mínima de 150 m.

As metodologias apresentadas anteriormente concentraram-se em esquemas baseados em reservatórios hidrelétricos ou ofertas de água existentes previamente. Já a metodologia de Lu et al. (2018), foca em armazenamento de energia de curto prazo (ciclo horário e diário) e que não envolvam cursos d'água perenes. Chamados de *Short-Term Off River Energy Storage (STORES)*, esses sistemas se referem a UHRs de ciclo fechado, situados longe de rios e, portanto, gerando impactos socioambientais reduzidos. As regiões destacadas para implementação das UHRs nesse estudo, são aquelas que possuem quedas entre 200 e 500 m, com uma razão $d/h < 15$, resultando em um mapa de isolinhas de quedas como mostrado na Figura 1 (LU et al., 2018).

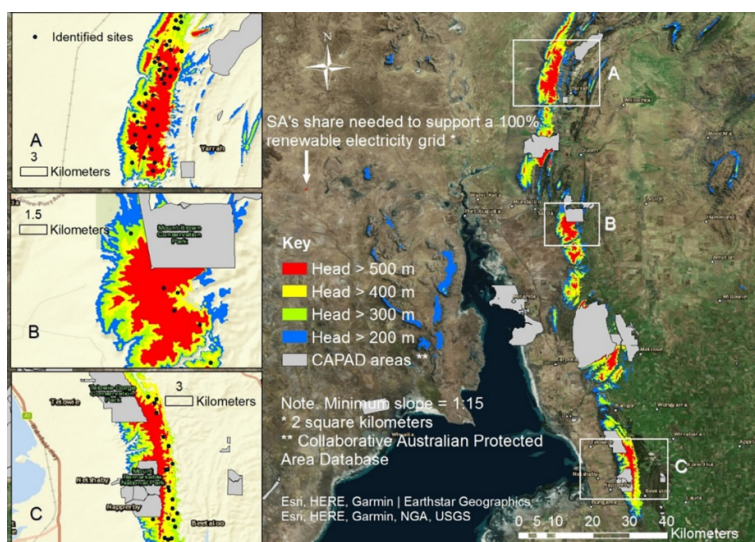


Figura 1 – Mapeamento de isolinhas de quedas

Os autores consideram duas alternativas de locais para a prospecção. A primeira delas são os do tipo “ninhos de peru” ou *turkey's nest*, que são locais de terrenos planos ou ligeiramente inclinados, que exigem a escavação do terreno para a construção de diques para o armazenamento de água, a ser utilizado como reservatório inferior. A segunda delas são os do tipo “ravinas secas”, ou *dry-gully sites*, que são sítios a serem explorados para o reservatório superior, e tratam-se de ravinas situadas no topo de montanhas, que podem, pela configuração do terreno (vales encaixados), facilitar a construção do reservatório de baixo impacto ambiental. Para a identificação de ravinas secas, os autores buscaram por linhas virtuais de escoamento de água e reservatórios de pelo menos 10 ha. Já para a identificação de ninhos de peru, os autores determinam uma altura máxima para o dique, bem como o volume de escavação do terreno exigido na sua construção. Por meio de modelos de terreno, esse estudo identificou a possibilidade da concepção dos ninhos de peru em quatro tipos de terreno: superfície plana, superfície inclinada, superfície tipo cume e superfície tipo depressão.

3. METODOLOGIA DE PROSPECÇÃO DE USINAS REVERSÍVEIS COM O USO DE DADOS SECUNDÁRIOS E SIG

A metodologia de prospecção de UHR aqui proposta foi inspirada na metodologia de Lu et al. (2018). A seleção de sítios para receber a instalação de uma Usina Hidrelétrica Reversível é o passo mais importante da prospecção e propõe-se que seja feita utilizando-se de dados secundários, bem como de *softwares* e técnicas de geoprocessamento, conforme também avalia Ahmed et al. (2021). É recomendado o uso dessas ferramentas dada a elevada quantidade de alternativas existentes, além de se poder incorporar restrições das mais distintas.

Inicialmente, é preciso entender as demandas elétricas e energéticas, bem como as particularidades da região de interesse para, finalmente, se estabelecer algumas diretrizes de prospecção. Como caso geral, as UHRs conectadas ao Sistema de Alta Tensão (SDAT) ou à Rede Básica (RB) devem estar localizadas em distâncias relativamente próximas aos pontos geoelétricos, onde os serviços são demandados. Como a metodologia aqui proposta permite a prospecção de UHRs de forma mais abrangente, independentemente da existência de cursos d'água, essa busca deve se concentrar em um perímetro cujo centro é o ponto geoelétrico demandante (centrais geradoras ou subestações). A definição dessas regiões, bem como dos volumes energéticos e potências de armazenamento demandados, não será focada neste trabalho.

Por simplicidade, adota-se uma circunferência, como ilustrado na Figura 2. A distância elétrica (d_{el}) corresponde a um valor de limite econômico (avaliação preliminar) para a localização da casa de máquinas, onde estarão as turbinas/bombas que efetivamente prestarão os serviços. Uma estimativa preliminar para o d_{el} pode ser obtida pela Equação 1, onde P é a potência em quilowatt, d_{el} a distância em quilômetro e V a tensão da linha de conexão em Volt. No entanto, esta fórmula precisa ser aperfeiçoada para aplicação em casos de maiores tensões e potências. Ainda, o reservatório da UHR pode ultrapassar o limite, pois não impactará o comportamento elétrico (a não ser para os estudos dinâmicos, que não serão abordados neste trabalho).

$$d_{el} = \frac{\left(\frac{V}{100}\right)^2}{P} \quad (1)$$

Onde: d_{el} – Distância elétrica [m]; V – Tensão da linha de conexão [V] e P – Potência [kW].

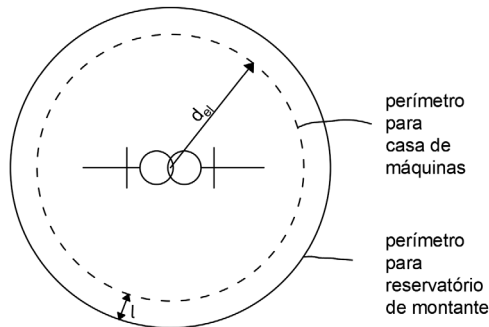


Figura 2 – Representação das distâncias de busca de UHRs em um estudo geoeletrico

Tendo sido definida a demanda eletroenergética a ser atendida (o volume energético armazenável a ser disponibilizado ao sistema regional), bem como delimitada a respectiva região geoeletrica, parte-se para o levantamento de dados secundários da região (socioambientais, usos múltiplos d'água, cartográficos, geológicos, topográficos e hidrometeorológicos). Os modelos digitais de elevação utilizados, normalmente de sensoriamento remoto, devem ter tamanho máximo de pixel de 30 m, sendo que, segundo Ahmed et al. (2021), valores de 10

ou 20 m melhoram significativamente as estimativas volumétricas.

Uma vez identificada e caracterizada a área de estudo, inicialmente deve-se excluir as áreas consideradas impeditivas à implantação de UHRs, tais como áreas de reservas indígenas, ocupadas por comunidades quilombolas, reservas florestais, unidades de conservação de proteção integral e de uso sustentável, áreas urbanas e áreas industriais que estejam inseridas na região geoeletrica delimitada (adaptado de BRASIL, 2007).

Dando início a prospecção de fato, recomenda-se levantar as áreas potenciais a serem exploradas, à semelhança do que propõe Lu et al. (2018). Para tanto, pode-se fazer uma varredura pixel a pixel, construindo um mapa com os desníveis máximos associados a um respectivo ponto (pixel), dentro de uma circunvizinhança definida. Esta circunvizinhança pode ser definida com base em um raio correspondente a maior distância aceitável entre reservatórios de montante e de jusante de uma UHR. O levantamento pixel a pixel permite a construção de isolinhas que definem áreas com quedas dentro de um intervalo pré-estabelecido na prospecção (50 ou 100 m). Sendo conservador, pode-se adotar como queda nesta área definida, e para fins de prospecção, o valor da isolinha inferior.

Para identificação dos locais mais adequados à implantação da UHR, deve-se partir do princípio de que a potência de um empreendimento hidrelétrico é diretamente proporcional à queda, e nesse caso, é recomendado que a diferença de altitude (h) entre os reservatórios superior e inferior seja de 100 a 700 m (altura medida entre as cotas do fundo dos reservatórios), conforme a Figura 3. Além disso, a distância horizontal (d) entre os reservatórios deve ser reduzida ao máximo, dada à redução de custos e de transitórios hidráulicos, procurando uma relação de d/h menor que 10 (adaptado de LU et al., 2018). Com base nisso, pode-se definir o raio de circunvizinhança de pesquisa entre 2 e 7 km (queda mínima de 100 m e máxima de 700 m para uma relação queda distância de 10). O mapa resultante define as regiões onde devem ser buscados os sítios barráveis para o reservatório de montante, correspondendo, estas, à áreas com quedas máximas de no mínimo 100 m, a um ponto distante a não mais que 7 km.

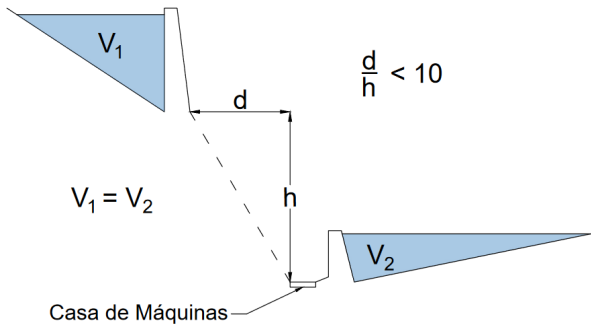


Figura 3 – Parâmetros de prospecção

Um caminho sugerido, na sequência, passa por definir os volumes de armazenamento necessários para diferentes quedas (Figura 4), segundo a Equação 2, considerando o rendimento geral da usina de 80%. O incremento nas quedas deve ser compatível com as curvas isolinhas adotadas (50 ou 100 m). Esta avaliação permite que se busque, para um intervalo de queda, barramentos que resultem no armazenamento desejado.

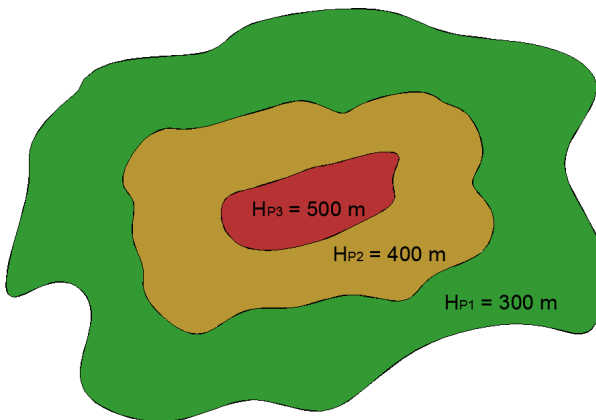


Figura 4 – Isolinhas de quedas

$$V_a = \frac{E_a}{2,18 \cdot H_p} \tag{2}$$

Onde: V_a – Volume armazenado útil [hm^3]; E_a – Energia armazenada [MWh] e H_p – Queda potencial [m].

Para prospecção de novos reservatórios, a fim de mitigar os impactos hídricos e ambientais, a opção recomendada é buscar ravinas secas para a implantação dos reservatórios, ou, ravinas onde existam pequenas vazões. Em outras palavras, deve-se buscar definir os eixos das barragens onde a área de drenagem seja relativamente pequena, o que implica menor vazão drenada.

Eventualmente, nas áreas a serem exploradas podem existir reservatórios, construídos ou planejados para outros fins, que podem ter seu uso compartilhado com uma UHR, o que traz menos impacto ambiental, já que limita o impacto a apenas a um reservatório adicional. Necessita-se, nestes casos, estudar o impacto sobre os sistemas hídricos afetados, dada a eventual redução do volume desses reservatórios para os usos originais. Dessa forma, restrições ou possíveis sinergias podem ser identificadas.

Definidas as áreas exploráveis, a montante e a jusante, deve-se procurar, de forma independente, eixos barráveis que resultem em reservatórios que correspondam, no mínimo, ao volume calculado anteriormente para atendimento ao armazenamento energético. Os volumes a serem armazenados dependem da área onde se está prospectando, como ilustra a Figura 5, na qual foram estudados seis diferentes pontos de implementação de barragem. O procedimento sugerido é seguir a linha de talvegue, de montante para jusante, avançando em um passo constante. O passo de prospecção sugerido é de 100 m, medidos longitudinalmente ao talvegue. Para cada eixo, busca-se a altura que resulte no armazenamento desejado, que atenda o valor calculado com a Equação (2).

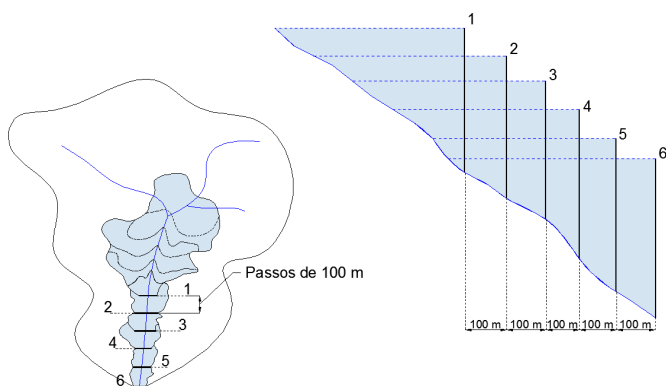


Figura 5 – Estudo de diferentes eixos de barramento em um talvegue

O tamanho das áreas de contribuição também são grandes preocupações no estudo de um aproveitamento hidrelétrico reversível. Os barramentos que possuem áreas de drenagem muito grandes implicam grandes vazões de cheias, que demandam maiores e mais complexas estruturas de vertimento de água e, portanto, mais caras. Nesse contexto, os locais de ravinas secas se enquadram como mais adequados para usinas com ciclo diário ou semanal, uma vez que se localizam em regiões de cabeceiras, portanto, sem delimitar grandes áreas de contribuição. Para usinas com armazenamento e área alagada expressiva, isso nem sempre é possível.

Podem-se definir algumas métricas que limitem estas buscas, como as áreas mínima e máxima de drenagem, a área inundada, o comprimento da crista da barragem e a altura da barragem. Estas duas últimas métricas podem ser substituídas ou complementadas por uma que combine estes dois parâmetros, refletindo o volume da barragem, como o parâmetro “altura ao cubo” ou “altura ao quadrado multiplicada pelo comprimento”, que refletem melhor o volume da barragem. A Equação 3, portanto, pode ser utilizada para determinar o volume da barragem. Recomenda-se adotar alguns parâmetros para se definir métricas e limites iniciais na seleção dos barramentos, limitando inicialmente as buscas, podendo estes serem mudados segundo a realidade que se está trabalhando, notadamente os tipos de ciclo.

$$V_B = \alpha \cdot H^3 \text{ ou } V_B = \beta \cdot H^2 \cdot L \quad (3)$$

Onde: V_B – Volume barragem [m^3]; H – Altura da barragem [m], L – Comprimento da barragem [m] e α, β – Parâmetros de proporcionalidade.

A busca dos reservatórios de jusante deve ser posterior aos de montante, pois, levantados os eixos possíveis de montante, restringe-se a busca para os reservatórios de jusante, dada a distância máxima associada à queda. Isto é um refinamento do mapa de quedas potenciais levantado preliminarmente, considerando, agora, somente os pontos de barramento sobre o talvegue. Assim, redefinem-se as áreas factíveis de jusante, de forma semelhante ao que se fez a montante (calcula-se, pixel a pixel, a maior elevação dentro do perímetro circunferencial de 2 a 7 km de raio), buscando sobre as linhas de drenagem ou ravina. Avalia-se também a ocorrência de reservatórios existentes ou planejados. Destaca-se que, usualmente, essas regiões baixas geralmente são bastante planas, o que dificulta atender as restrições impostas, como área inundada e comprimento da barragem.

Definidas as barragens e os reservatórios potenciais de montante e de jusante, passa-se a buscar a combinação dos elementos destes dois conjuntos, considerando métricas excludentes, como a distância em verdadeira grandeza entre os barramentos. Esta é a hipotenusa do triângulo formado pelas quedas e distâncias entre os barramentos (tomando os pontos sobre o talvegue). Outro critério é excluir aqueles pares que têm, simultaneamente, barragens potencialmente mais caras. Uma métrica seria limitar a soma de “altura ao quadrado multiplicada pelo comprimento” das barragens de montante e de jusante. Ainda, os pares de projetos selecionados devem ter seus principais parâmetros revisados, destacando-se as cotas de coroamento dos reservatórios, quedas e os volumes armazenados, permitindo uma melhor estimativa dos custos, que servirão a uma revisão da hierarquização final.

Pode haver casos em que reservatórios de montante potencialmente atrativos não encontrem um par correspondente à jusante. Sugere-se, então, verificar para os 1% melhores reservatórios de montante, selecionados segundo alguma métrica definida (recomenda-se uma equação paramétrica que inclua comprimento da barragem, altura da barragem e área do reservatório), uma alternativa técnica. Recomenda-se, para esses bons reservatórios de montante que não encontrem par a jusante, a utilização dos reservatórios chamados ninhos de peru (*turkey's nest*), para a construção do reservatório inferior. No entanto, ressalta-se que o uso de *turkey's nest* não é recomendado para reservatório de regularização sazonal (que exige grandes volumes armazenados). No caso de uso de reservatórios de jusante já existentes, pode-se encontrar reservatórios de montante adequados. Nestas condições excepcionais, deve-se também analisar o uso de *turkey's nest*.

A barragem deste tipo de reservatório não está assentada em seções predominantes transversais ao talvegue, nem tampouco se escora em ombreiras sadias e próximas. Em verdade, forma um conjunto de diques sequenciados, fechando-se em um formato poligonal, sendo, pois, pouco dependente das condições topográficas. Este lago, dada esta peculiaridade, pode ser localizado o mais perto possível do reservatório de montante, reduzindo o custo da adução, que, de certa forma, pode compensar seu maior custo. Para diminuir a altura dos diques, é comum haver escavação do solo dentro do reservatório, aproveitando o material escavado, quando de qualidade, na construção dos próprios diques. Para fins de prospecção para assentamento destes reservatórios, partindo-se do reservatório de montante, buscam-se as áreas mais próximas localizadas entre as cotas que garantam a queda desejada.

Uma técnica a ser aplicada, proposta pelos autores do presente

trabalho, seria, a partir do ponto de menor distância, ir posicionando barramentos circulares (uma aproximação preliminar para o conjunto poligonal de diques – Figura 6) e estimando o volume total, que poderia ser feito através de um somatório dos “comprimentos de arco de circunferência pelas respectivas alturas nos pontos médios elevado ao quadrado”, conforme a Equação 5. Para tanto, necessita-se partir de um diâmetro inicial, que pode ser estimado como sendo o correspondente ao volume procurado, fixada uma altura média de barragem (30 m). Lançada a barragem circular, calcula-se o volume do reservatório, estimado como sendo o somatório das “áreas dos setores circulares multiplicada pela altura nos pontos médios do respectivo setor da barragem”, conforme a Equação 7.

$$\frac{\theta D}{2} = S \quad (4)$$

$$V_B = \sum (S_i \cdot H_i^2) \quad (5)$$

$$A_i = \left(\frac{\theta \cdot D^2}{8} \right) \quad (6)$$

$$V_R = \sum (A_i \cdot H_i) \quad (7)$$

Onde: V_B – Volume do barramento [m^3]; S_i – Comprimento do arco [m]; H_i – Altura média [m]; D – Diâmetro [m]; A_i – Área do setor [m^2] e V_R – Volume do reservatório [m^3].

Corrige-se o diâmetro partindo-se do inicial, multiplicando-o pelo quadrado da relação “volume desejado dividido pelo volume calculado”. Uma só interação corretiva já é o bastante para o nível de prospecção. A Figura 6 ilustra o processo.

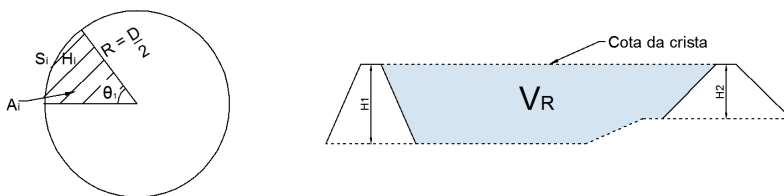


Figura 6 – Esboço de uma barragem de ninho de peru

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 7 ilustra as principais etapas associadas à prospecção de UHRs, sendo as etapas antecedentes e posteriores destacadas na cor laranja.

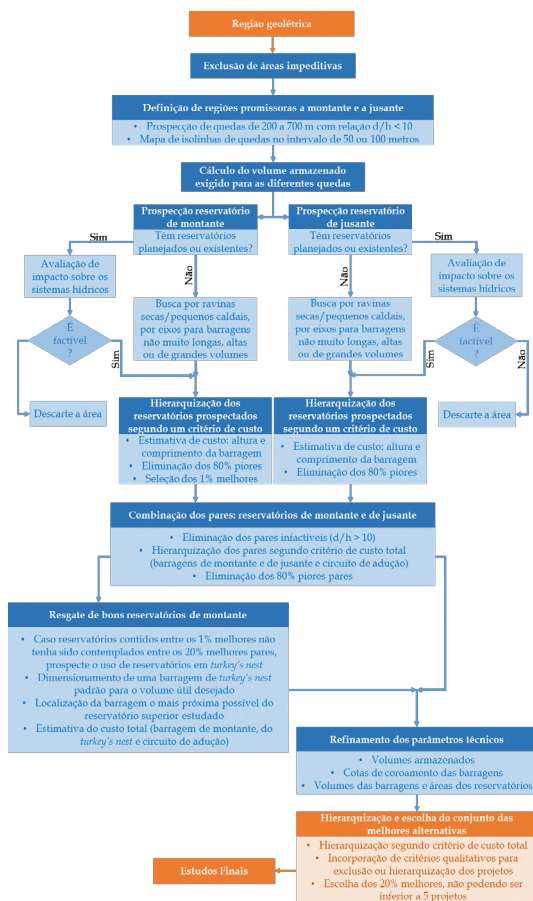


Figura 7 – Etapas associadas à prospecção de UHRs

Ressalta-se que a prospecção apresentada é para uma UHR com reservatórios de montante e jusante capazes de atender a demanda energética de armazenamento especificada em estudos eletroenergéticos que devem ser realizados de forma prévia a aplicação a metodologia apresentada.

Pode-se estabelecer estratégias de prospectar em várias rodadas, sendo que em cada uma destas é definido um volume energético armazenável, partindo-se do volume demandado pelos estudos eletroenergéticos. Por exemplo, busca-se na primeira rodada as melhores alternativas para um volume V_a ; em segunda rodada, buscam-se as melhores alternativas para um volume $V_a/2$; em segunda terceira, caso couber, busca-se as melhores alternativas para um volume $V_a/3$. O conjunto das melhores alternativas constitui-se das melhores alternativas de cada rodada. Isto equivale às alternativas de partição de queda constantes nos inventários de usinas hidrelétricas convencionais, não podendo misturar as alternativas de rodadas diferentes. Pode-se, para evitar um número elevado de alternativas selecionadas, usar um critério semelhante de priorização para escolher as melhores alternativas, lembrando que deve-se buscar armazenamentos totais energéticos semelhantes.

Já na Figura 8 ilustra-se um cenário no qual o reservatório superior não encontrou, nos estudos de prospecção, um par a jusante que respeitasse as restrições definidas na metodologia. Por outro lado, este reservatório se encontra nos 1% melhores estudados a montante. Então, avalia-se a construção de um reservatório *turkey's nest* a jusante. Nesta figura mostram-se quatro opções: o desnível entre reservatório de montante e o reservatório A apresenta uma queda de 500 m, mas a distância entre eles ultrapassa o valor de 5 km, inviabilizando esta alternativa; o Reservatório B também está associado a uma queda de 500 m, mas respeita a distância limite.; a alternativa C é mais econômica em termo de circuito de adução, mas há uma perda significativa de queda bruta (100 m); a opção D apresenta-se como a mais atrativa, pois tem a mesma queda de B, mas tem sistema de adução mais curto, se configurando como a alternativa a ser estudada junto com o reservatório de montante.

Por fim, na Tabela 1 e Tabela 2 se apresentam alguns parâmetros definidos tomando como referência reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos convencionais brasileiros, que são boas indicações para UHRs com tempos de descarga de até 10h.

Tabela 1 – Relação Potência e Área Alagada por reservatório

Potência (P)	Área Alagada (S _R)
Até 10 MW	Menor que 0,1 km ²
10 MW < P < 100 MW	Menor que 0,5 km ²
>100 MW	Menor que 10 km ²

Tabela 2 – Relação Potência, Vazão de Cheia e Área de Drenagem

Potência (P)	Vazão de Cheia (Q _c)	Área de Drenagem (A _d)
Até 10 MW	< 30 m ³ /s	< 30 km ²
10 MW < P < 100 MW	< 70 m ³ /s	< 100 km ²
>100 MW	< 500 m ³ /s	< 300 km ²

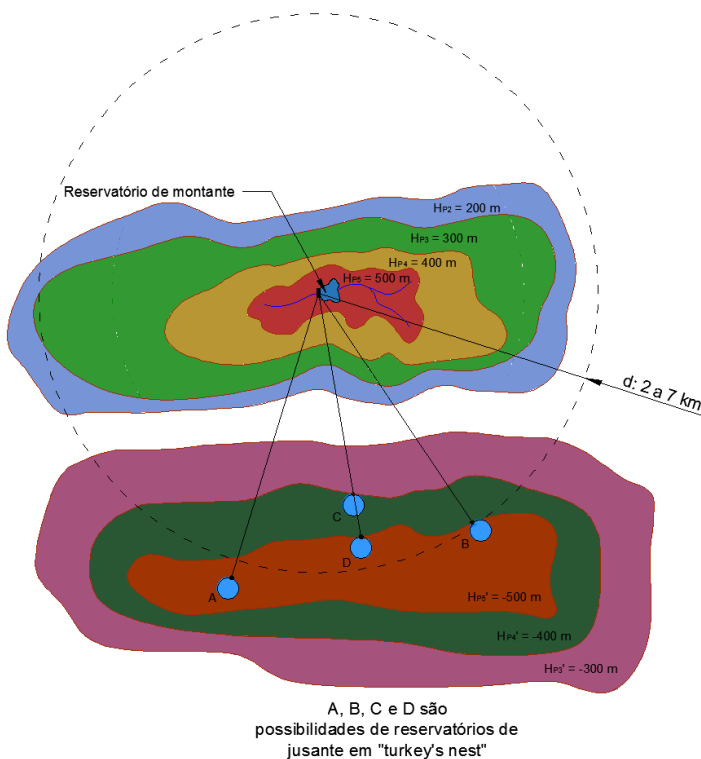


Figura 8 – Prospecção de uma barragem de ninho de peru para o reservatório inferior

Na sequência, apresenta-se o resultado parcial de um estudo de prospecção para uma UHR para atender o sistema elétrico de distribuição associado à SED de Itajubá (MG). Neste estudo, encontrou-se um raio definidor da região geoeletrica de 8 km, e estabeleceram-se os parâmetros definidores da prospecção (Tabela 3), além de considerar preferencialmente a busca em locais de ravina seca e exclusão das áreas impeditivas (áreas urbanas, unidades de conservação ambiental, etc.). Já a Figura 9 ilustra algumas das alternativas prospectadas.

Tabela 3 – Parâmetros definidos

Energia Armazenada (Ea)	55 MWh
Resolução do MDE (SRTM-C)	30 m
Isolinhas de elevação	50 m
Queda Potencial (hp)	200 m
d/h	<10
Distância máxima entre os reservatórios de montante e jusante (d)	<2.000 m
Volume Armazenado (Va)	0,13 hm ³
Volume útil	2/3
Altura mínima do barramento	10 m
Comprimento máximo das barragens	300 m

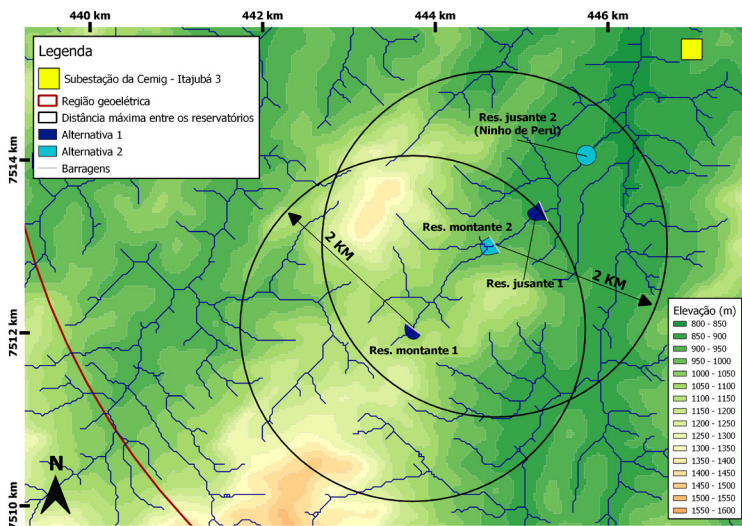


Figura 9 – Alternativas de UHR prospectada

5. CONCLUSÃO

A proposta metodológica considera a utilização de dados secundários e de disponibilização gratuita, como os modelos digitais de elevação do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM-C) de resolução de 30 m e desvio-padrão vertical de 3,33 m, ou as imagens dos satélites da série *Landsat*, visto que a prospecção de alternativas almejadas trata-se de um estudo preliminar dos projetos com potencial de UHRs para uma área e para um volume energético demandado predeterminados.

Como pontos de destaque da metodologia proposta pode-se citar: as delimitações impostas à área de estudo, como os aspectos impeditivos socioambientais (área urbana, área de proteção ambiental, entre outros) e o estabelecimento de parâmetros técnicos de busca (desníveis mínimos, distância máxima entre os reservatórios, etc.), visando reduzir o número de alternativas viáveis para estudo posterior. A busca se baseia nos estudos das regiões de montante e jusante, de forma independente, avaliando as áreas com os maiores desníveis, condições de ravinas secas ou de “*turkey’s nest*”, reservatórios já existentes, entre outros aspectos. A seleção dos arranjos mais atrativos se dá segundo o critério de menor custo. Por exemplo, na combinação dos reservatórios de montante e jusante, entre outros critérios, busca pelo arranjo com menor comprimento do circuito de adução.

No estudo de caso apresentado, na Alternativa 1 os reservatórios encontrados possuem (como estimativas preliminares) pequenas áreas alagadas (4,5 ha, considerando os dois reservatórios) e circuito de adução de 1,8 km (em planta). Já para a Alternativa 2, com circuito de adução estimado em 1,4 km, foi considerado o uso de reservatórios ninho de peru para o reservatório de jusante, devido à dificuldade de encontrar regiões que permitissem o barramento do talvegue sem grandes áreas alagadas associadas.

Como a metodologia proposta se baseia fortemente no volume energético demandado, a prospecção independe dos diferentes tipos de ciclos que a UHR pode operar: diário, semanal, sazonal ou intermitente. No estudo de caso, a UHR foi dimensionada para operar com ciclo diário, atendendo as demandas de ponta.

Ressalta-se que a metodologia proposta faz o uso de dados secundários, sendo necessário que, após a seleção das alternativas mais atrativas, seja realizado um refinamento dos dados para um melhor detalhamento do projeto e sequência dos estudos de implantação da UHR.

Por fim, destaca-se que a metodologia apresenta uma estratégia de prospecção que não se baseia meramente na otimização, mas sim buscando uma solução robusta em termos de engenharia, pois, desde seu início, são descartados elementos (reservatórios e sistemas

de adução) potencialmente custosos ou inviáveis tecnicamente e ambientalmente. Ademais, os valores indicados para as faixas apresentadas visam reduzir o número de alternativas a serem exploradas, não tendo caráter rígido, recomendando-se que o desenvolvedor adeque a sua realidade.

Nota: Esta metodologia foi desenvolvida no âmbito do Projeto de P&D ANEEL “Desenvolvimento e Aplicação de um Manual de Referência para Projetos de Usinas Hidrelétricas Reversíveis”, proposto pela State Grid Brazil Holding, e desenvolvido pelo Gesel, Thymos Energia e Power China (atualmente em andamento).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, H.; et al. A GIS model for exploring the water pumped storage locations using remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2021.

BRASIL. Estudos de Inventário de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR). Brasília (DF): Ministério de Minas e Energia: Empresa de Pesquisa Energética, 2019.

_____. Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas/ Ministério das Minas e Energia, CEPEL,2007.

HAAS, J.; et al. Revisiting the potential of pumped-hydro energy storage: A method to detect economically attractive sites. *Renewable Energy*, 2022.

LU, B.; et al. Geographic information system algorithms to locate prospective sites for pumped hydro energy storage. *Applied Energy*, 2018.

SCHREIBER, G. Usinas hidrelétricas, 1978.