

## GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

### IDENTIFICAÇÃO DE LOCAIS PARA A CONSTRUÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS

**LUIZ R. S. C. DE ALBUQUERQUE (1); RAFAEL KELMAN (1); RODRIGO F. CALILI (2); TAINÁ M. CUNHA (1)**

**PSR (1); PUC-Rio (2)**

#### RESUMO

A participação de fontes renováveis variáveis vem crescendo muito nos últimos anos, o que torna cada vez mais relevante a busca por recursos energéticos capazes de aumentar a flexibilidade operativa de sistemas elétricos e mitigar a incerteza e variabilidade de sua produção. Neste sentido as Usinas hidrelétricas reversíveis (UHR) poderiam ser empregadas de forma econômica e com baixos impactos ambientais. Considerando as lacunas na literatura, o artigo apresenta uma metodologia para identificar locais com potencial para seleção econômica de UHR através de técnicas avançadas de geoprocessamento. Um estudo de caso ilustra a metodologia desenvolvida. Os resultados são discutidos e as principais conclusões apresentadas, assim como os próximos passos.

#### PALAVRAS-CHAVE

Usinas reversíveis; geração renovável; Sistema de Informações Geográficas - SIG

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A expansão do uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica nos últimos anos é resultado do encarecimento dos combustíveis fósseis e da crescente preocupação com as mudanças climáticas e com os impactos ao meio ambiente. Entretanto, a disponibilidade de alguns recursos naturais necessários às matrizes energéticas renováveis, como o vento e a irradiação solar, é de natureza intermitente e sazonal, podendo afetar a operação do sistema elétrico (Canales *et al.*, 2015).

Uma das alternativas para dar equilíbrio à carga do sistema é o armazenamento de energia, que oferece benefícios ao fornecimento de energia elétrica (serviços ancilares, por exemplo) e regula a frequência em momentos de alta demanda com baixa oferta de energia proveniente das renováveis, contribuindo com a inércia necessária para que a demanda não varie instantaneamente (Barbour *et al.*, 2016). A tecnologia de larga escala mais utilizada no mundo para armazenamento é o de bombeamento hidráulico por meio de usinas hidrelétricas reversíveis – UHR (IHA, 2018). Em relação a outras tecnologias, as UHR oferecem uma solução de alta eficiência, tempo de resposta mais rápido e vida útil mais longa (Rehman *et al.*, 2015). O funcionamento é caracterizado pelo bombeamento da água de um reservatório inferior para sua acumulação em um reservatório superior visando à geração de energia nos períodos de alta demanda (Barbour *et al.*, 2016).

As alternativas de armazenamento de energia já estão em pauta no planejamento do setor elétrico brasileiro como opção para garantir a expansão do sistema de forma econômica e sustentável. No Plano Decenal de Expansão de Energia de 2030 (EPE, 2021a), as UHR ganham destaque como um dos recursos disponíveis para expansão da oferta para atendimento de ponta a partir de 2026. A EPE entende que estudos iniciais são etapa importante para subsidiar o planejamento de expansão do setor e orientar a definição de aspectos regulatórios, ainda inexistentes, relacionados aos benefícios sistêmicos desse tipo de solução.

Em âmbito mundial, o tema vem mobilizando diversas instituições do setor elétrico e ambiental. Lançado em 2020 pela *International Hydropower Association* (IHA), o Fórum Internacional sobre Usinas Hidrelétricas Reversíveis visa desenvolver orientações e recomendações sobre a participação dessas usinas na transição energética para uma economia global com baixa emissão de carbono.

Organizadas em relatório técnico (JRC, 2012), as diretrizes para identificação de locais potenciais para implantação de UHR com a utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG), resultados de um workshop realizado na Holanda pelo *Institute for Energy and Transport* (IET) em 2012, orientaram pesquisas acadêmicas desenvolvidas nos anos subsequentes.

Lacunas teóricas foram percebidas nas iniciativas posteriores de exploração do tema no campo acadêmico (Rogean *et al.*, 2017; Soha *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2018; Ghorbani *et al.*, 2019; Nzotcha *et al.*, 2019; Hunt *et al.*, 2020) e em órgãos governamentais (EPE, 2019). Esses estudos não levam em conta uma ou mais dos seguintes aspectos: o uso específico e a operação de reservatórios existentes, critérios ambientais além de restrições, características geológicas, custos associados aos seus diversos componentes em formulação matemática para tomada de decisão.

A fim de contribuir para as tomadas de decisão no planejamento energético brasileiro, o objetivo deste trabalho é propor um modelo para a seleção de locais propícios à implantação de usinas hidrelétricas reversíveis, com o auxílio de ferramentas do SIG e de formulações matemáticas que levem em conta, não apenas, critérios fisiográficos, energéticos e econômicos, mas também socioambientais. Esse modelo é descrito na seção 2, e sua aplicação apresentada na seção 3, com as conclusões e recomendações consolidadas na seção 4.

## 2.0 - METODOLOGIA

O modelo proposto nesta dissertação procura definir uma formulação que, a partir de uma abordagem baseada em SIG combinada com soluções de um problema em programação inteira, busque minimizar os custos de construção de uma UHR.

A aplicação do conceito de padrões ternários locais (Liao, 2010) à classificação de elementos de relevo é possível desde que se disponha de um Modelo Digital de Elevação (MDE), conforme mostrado em (a) a esquerda da FIGURA 1. Em relação ao valor da célula central, indicado na cor preta em (b) ao centro da mesma figura, as vizinhas são rotuladas assim: se os seus valores são maiores, +1 (em vermelho); se iguais, 0 (em verde); se menores, -1 (em azul). A partir dessa definição, esses padrões podem ser associados a células *raster* do MDE. Na malha à esquerda da figura abaixo (c), a célula central é indicada por um número e preenchida na cor preta.

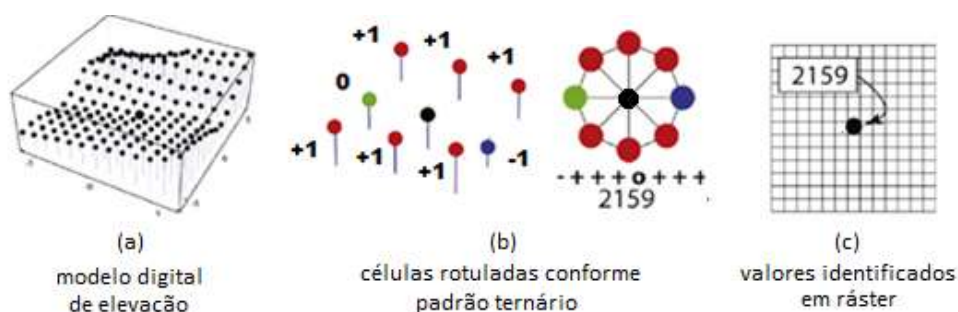


FIGURA 1 - Aplicação de padrões locais a elementos de relevo. Adaptado de Jasiewicz & Stepinski (2013)

*Geomorphons* são as microestruturas mais básicas da paisagem que podem ser extraídas de um MDE original com um pequeno custo computacional. Um único elemento típico de relevo pode ser identificado por vários geomorphons diferentes. Eles trazem vantagens para a classificação das formas de relevo na medida em que são sustentados por princípios de visão de máquina e permitem que se trabalhe de forma simultânea em várias escalas. Além disso, ainda segundo Jasiewicz & Stepinski (2013), o método se mostra robusto e computacionalmente eficiente para este tipo de classificação, já que dispensa a necessidade de cálculos quadráticos e aplicação de algoritmos relativamente complexos. A FIGURA 2 exibe os 10 elementos de relevo mais comuns, representados geometricamente e de acordo com a classificação do padrão ternário.

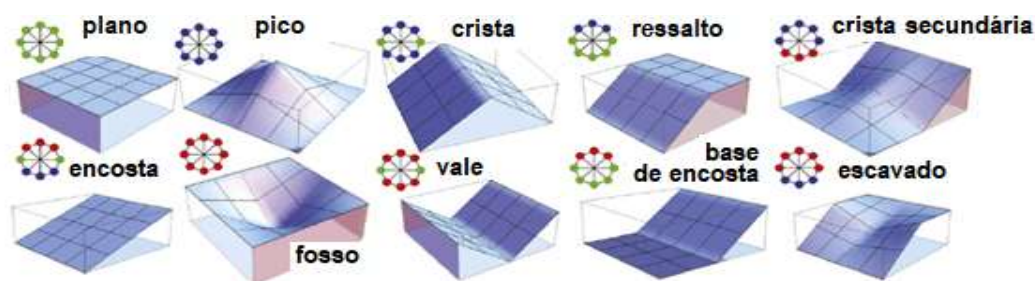


FIGURA 2 - Elementos de relevo representados por padrões locais. Adaptado de Jasiewicz & Stepinski (2013)

Na busca de locais para usinas hidrelétricas reversíveis, o conceito de *geomorphons* pode ser aplicado para identificação de formas de relevo mais adequadas aos reservatórios, dando-se preferência a formas assemelhadas ao fosso ou a suas classificações mais próximas. Nesta etapa, curvas de cota, volume e custo são definidas em diversos locais a partir de um ponto central (FIGURA 3). O método consiste em considerar  $n$  direções e traçar perfis

longitudinais para diversas alturas. Assim, obtém-se um menu de alternativas conforme as necessidades de armazenamento e hierarquizadas segundo seus custos. Essa hierarquização permite a seleção de locais mais promissores, que podem ser agrupados, conforme ilustrado pela FIGURA 4.

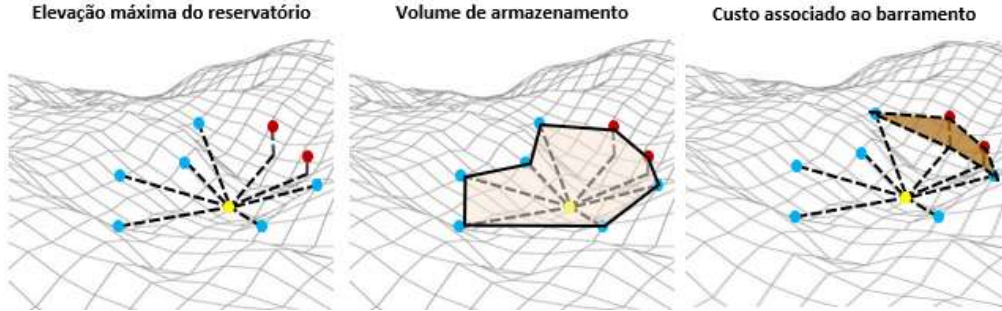


FIGURA 3 - Definição das curvas cota, volume e custo dos reservatórios. Elaboração própria.



FIGURA 4 - Seleção preliminar de alternativas. Fonte: Elaborado a partir do modelo HERA (PSR, 2021)

Os parâmetros selecionados para composição da função relacionada aos quatro principais componentes relacionados aos custos de implantação de uma UHR: *SA* – impactos socioambientais, *OC* – obras civis, *EQ* – equipamentos eletromecânicos e *IE* – conexão às infraestruturas de rede elétrica e viária. Há uma quinta parcela referente a custos indiretos e outros não considerados pelas simplificações propostas: *OT* – outros custos. Esses componentes são reunidos no somatório (*CT*) apresentado na equação (1). A equação de cada um dos componentes pode ser detalhada conforme a etapa de aplicação e estar associada às especificidades da área em estudo.

$$CT = SA + OC + EQ + IE + OT \quad (1)$$

Para o componente de impactos socioambientais (*SA*, em \$), o que se propõe nesta dissertação é que não se adote apenas critérios de exclusão de áreas de proteção como, em geral, visto na literatura. Sugere-se aqui a classificação dos impactos nas áreas afetadas *Asa* e a ponderação de diferentes coeficientes *Ksa* que representem um percentual do custo direto de obras civis, equipamentos e infraestrutura, conforme demonstrado na equação (2).

$$SA = \frac{\sum_i Ksa_i Asa_i}{\sum_i Asa_i} (OC + EQ + IE) \quad (2)$$

No caso do componente das obras civis (*OC*, em \$), devem ser consideradas duas parcelas: uma associada aos volumes de barramento necessários ao fechamento das selas topográficas dos novos reservatórios ( $V_{bar}$ , em  $m^3$ ), e a outra aos quantitativos do circuito hidráulico de geração que deve conectar quaisquer dois reservatórios, levando em conta os volumes de obras civis e o peso da blindagem dos condutos forçados (respectivamente,  $V_{hid}$ , em  $m^3$ , e  $P_{hid}$ , em kg). Cada uma delas deve ser multiplicada pelo seu respectivo custo unitário, respectivamente denominados  $C_{bar}$ ,  $C_{hid1}$  (ambos, em  $\$/m^3$ ) e  $C_{hid2}$  (em  $\$/kg$ ). Um coeficiente  $K_{oc}$ , sempre maior que 1, deve ser aplicado para considerar as condições geológicas de cada local de forma a maximizar os custos, penalizando áreas menos adequadas às obras. A equação geral (3) correspondente a esse componente é definida a seguir.

$$OC = K_{oc} (C_{bar} V_{bar} + C_{hid1} V_{hid} + C_{hid2} P_{hid}) \quad (3)$$

O terceiro componente deve representar o custo dos equipamentos (*EQ*, em \$), por sua vez, associados a queda disponível entre os reservatórios (*H*, em m) e o volume de armazenamento (*V*, em  $m^3$ ), convertido em vazão segundo o ciclo operacional pretendido ( $Q = V/h$ , sendo *Q* em  $m^3/s$ ), como na equação (4).

$$EQ = K_{eq} f(H, Q) \quad (4)$$

O componente de custo  $IE$ , em \$, deve considerar às distâncias relativas às infraestruturas viária ( $IE_v$ ) e elétrica ( $IE_e$ ) existentes na área de estudo. Neste caso, as parcelas correspondem ao produto das extensões aproximadas viária e elétrica ( $L_v$  e  $L_e$ , ambas em metros), que podem ser obtidas diretamente do MDE, pelos respectivos custos ( $C_v$  e  $C_e$ ), ambas em \$/m, resultando na equação (5).

$$IE = IE_v + IE_e = C_v L_v + C_e L_e \quad (5)$$

O último componente de custo ( $OT$ , em \$) deve refletir não só os custos indiretos como também custos não considerados nas simplificações das equações acima propostas. Conforme equação (6), fator  $K_{ot}$  deve corresponder a um percentual que represente esses outros custos.

$$OT = K_{ot} (SA + OC + EQ + IE) \quad (6)$$

### 3.0 - ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso, foi utilizado o modelo computacional HERA (PSR, 2021), em sua versão desenvolvimento para inclusão de projetos de usinas hidrelétricas reversíveis, dentro do contexto do projeto de P&D em execução pela PSR - Soluções e Consultoria em Energia Ltda, para a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), inscrito sob o número PD-00678-0120/2020 com empresas cooperadas EDF Norte Fluminense, CTG Brasil, Elera e Light.

#### 3.1. Dados básicos e critérios de classificação

Como base cartográfica, utilizou-se um MDE chamado MERIT Hydro (Yamazaki *et al.*, 2019), que é uma versão hidrologicamente consistida, derivada do MERIT DEM, desenvolvido por Yamazaki *et al.* (2017), e outros conjuntos de dados de corpos d'água (G1WBM, GSWO e OpenStreetMap). Para a definição do coeficiente  $K_{sa}$ , fator percentual para a definição dos custos socioambientais, foram utilizados três mapas temáticos: unidades de conservação, áreas prioritárias (ambos, obtidos na página do MMA, 2021<sup>1</sup>) e uso do solo (Soares-Filho *et al.*, 2021)<sup>2</sup>. No modelo computacional, os impactos socioambientais para essas áreas foram classificados como alto, médio, baixo. Conforme FIGURA 5, as classificações dadas por especialistas aos três mapas temáticos foram sobrepostas resultando em um mapa de cores em que se faz prevalecer nas áreas de interseção sempre o maior valor atribuído a cada tema.

Para a definição do coeficiente  $K_{oc}$ , fator multiplicador dos custos civis relacionado às condições geológico-geotécnicas, foi utilizado o Mapa Geológico do Estado da Bahia do MME (2003)<sup>3</sup>. A classificação da qualidade da rocha, foi realizada por especialista por meio de ferramenta específica do HERA, resultando no mapa de cores mostrado na FIGURA 6. Para a definição do componente de custo de infraestrutura, foram utilizados o mapa que combina as camadas rodoviária do DNIT (2019), com ajustes baseados nas informações Google Maps, e político-administrativa do IBGE (2010)<sup>4</sup>, e o mapa do sistema elétrico nacional, conforme Webmap EPE (2021b)<sup>5</sup>.

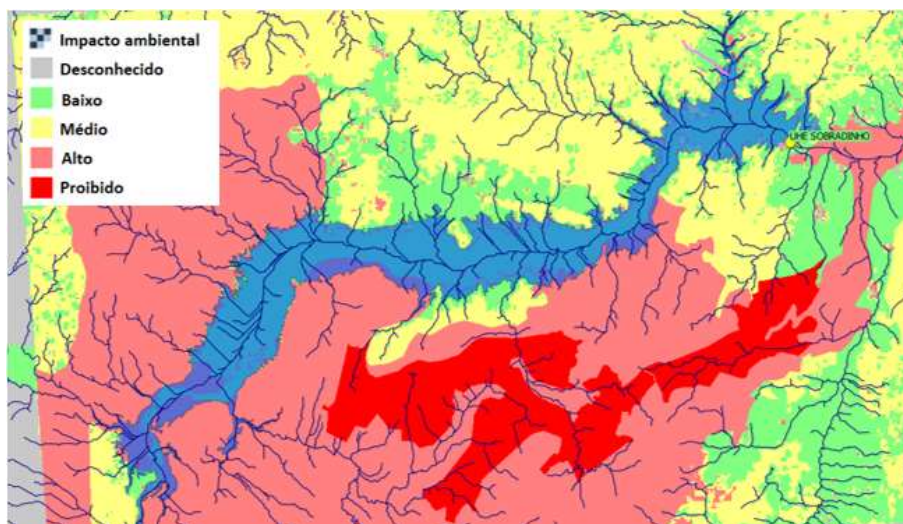


FIGURA 5 - Mapa de impactos socioambientais elaborado a partir do HERA (PSR, 2021)

<sup>1</sup> <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/mma/openlayers.htm?2v04o1ka41cipu8683he1lctv2>

<sup>2</sup> <https://maps.csr.ufmg.br/>

<sup>3</sup> <https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>

<sup>4</sup> <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit/bitmodosmapas>

<sup>5</sup> <https://gisepepr2.epe.gov.br/WebMapEPE/>



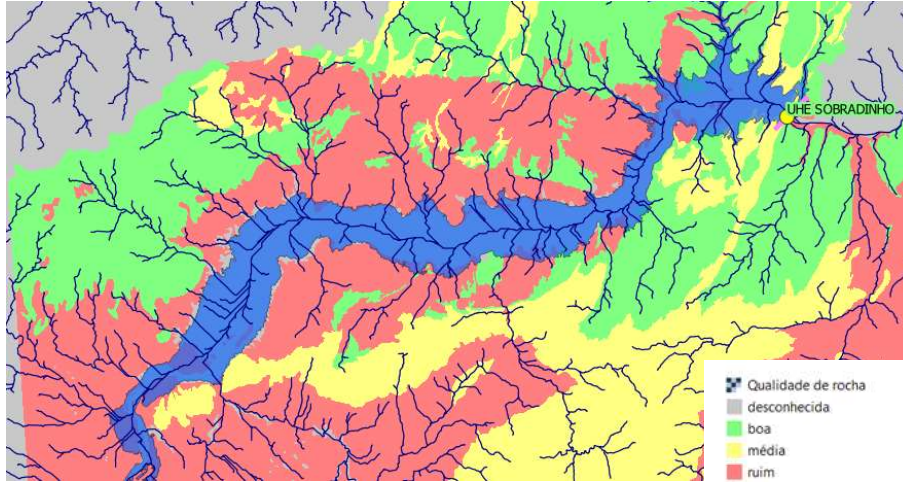


FIGURA 6 - Mapa de condições geológico-geotécnicas elaborado a partir de dados de campo e literatura (Silva et al., 2021)

### 3.2. Detalhamento da função de custos para aplicação da metodologia

São descritas as premissas adotadas para valoração dos coeficientes, dos custos unitários e dos parâmetros necessários, definidos por especialistas em cada área de conhecimento, para cada um dos componentes de custo. Para efeito das simulações realizadas no âmbito desta dissertação, o coeficiente referente a outros custos  $K_{ot}$  (6), foi considerado igual a 0.40. Considerou-se também que o coeficiente socioambiental  $K_{sa}$  (2), se classificado como alto, médio e baixo deveriam assumir, respectivamente, os seguintes valores: 0,20, 0,10 e 0,05. Por fim, o coeficiente  $K_{oc}$  (3) recebeu valores iguais a 1,2, 1,4 e 2,0, respectivamente correspondentes a três possíveis classificações da qualidade da rocha para implantação: boa, média ou ruim (ou desconhecida).

Considerando os custos unitários adotados ( $C_{bar} = \text{US\$}10/\text{m}^3$ ;  $C_{hid1} = \text{US\$}120/\text{m}^3$  e  $C_{hid2} = \text{US\$}3/\text{kg}$ ) e equações que definem os quantitativos do barramento ( $V_{bar}$ ) e do circuito de adução ( $V_{hid}$ ,  $P_{hid}$ ) foi obtida a equação (7) para os custos das obras civis (OC). O primeiro termo corresponde à integração numérica da seção trapezoidal da barragem, onde  $h_i$  (m) é sua altura na seção  $i$ , a largura da crista é 4m e o talude da barragem 1V:2,5H. O segundo termo é relativo ao circuito hidráulico com extensão  $L_{hid}$  (m) em que  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) é a vazão de projeto da UHR. O segundo termo admite uma velocidade limite de escoamento de 4 m/s (daí o coeficiente  $30 = 120 / 4$ ). Finalmente, o terceiro termo corresponde ao custo para a blindagem em aço do terço final do túnel, próximo à casa de força.

$$OC = K_{oc}(\sum_i(40h_i + 25h_i^2) + 30 L_{hid} Q + 450 L_{hid}\sqrt{Q}) \quad (7)$$

Neste trabalho, utilizou-se a equação de custos eletromecânicos definida por Andrade *et al.* (2020) a partir de uma ferramenta de regressão simbólica baseada em Programação Genética Cartesiana Diferencial (dCGP)<sup>6</sup> da Agência Espacial Europeia – ESA (Izzo *et al.*, 2017). A equação foi gerada de forma a minimizar o erro da regressão quando utilizadas variáveis de entrada candidatas (queda, vazão) e resultados correspondentes (custos unitários). A equação (8) a seguir é apresentada considerando o coeficiente  $K_{eq}$  igual a 1,40 para conversão de custos de equipamentos de usinas hidrelétricas convencionais para reversíveis.

$$EQ = 1,4 \left( \frac{3600P}{\sqrt{H}} + 8600 \right) \quad (8)$$

No caso do componente de custo de infraestrutura, os custos unitários adotados, por sua vez, foram  $C_v = \text{US\$}400/\text{m}$  e  $C_e = \text{US\$}750/\text{m}$ . Sendo assim, o custo foi definido conforme a equação (9).

$$IE = 400 L_v + 750 L_e \quad (9)$$

### 3.3. Premissas e estratégia de aplicação no modelo computacional

Para as simulações realizadas nesta dissertação, que envolvem uma busca comparativa preliminar de locais para o reservatório superior, por simplificação, optou-se por adotar o nível do reservatório inferior na elevação 392,00 m. Essa cota é a mais próxima situada abaixo do NA máximo normal da UHE Sobradinho (elevação 392,50 m), que pode ser adotada no modelo. Os principais dados de entrada para as simulações no HERA são a potência instalada ( $P$ , em MW) e o tempo de geração ( $\Delta t$ , em horas) cujo produto resulta na capacidade de armazenamento pretendida (em MWh). A partir desses dados, o modelo permite dois tipos de busca. Uma delas, denominada busca por alternativas locais, apresenta no mapa todas as alternativas locais possíveis para um único par  $P$  e  $\Delta t$ . A outra, identificada como busca por projetos, indica a melhor alternativa para diversos pares  $P$  e  $\Delta t$ .

<sup>6</sup> <https://esa.github.io/dcgp-web/#/>

Neste estudo de caso, optou-se por seguir uma estratégia de análise utilizando essas duas etapas. Na primeira etapa, foi realizada uma busca por alternativas locais em torno de todo o reservatório para uma potência da mesma ordem de grandeza da UHE Sobradinho (1050 MW), de forma a considerar para as alternativas com impacto significativo para o sistema, e tempos de geração correspondendo a ciclos variados. Na segunda etapa, a busca pelos melhores projetos priorizou a área mais promissora dentre as identificadas na primeira etapa, selecionando os tempos de geração de acordo com os resultados preliminares e variando as potências entre 500 MW e 1500 MW.

#### 3.4. Apresentação e discussão dos resultados das simulações

Na primeira etapa do estudo de caso foram simuladas 4 alternativas de tempos de geração para uma potência instalada de 1000MW. Nela, o modelo não encontrou resultados para a alternativa com tempo de geração de 1 mês, nem para 1 semana, o que mostra que há um limite para o armazenamento em torno do reservatório da UHE Sobradinho ditado pelas características geográficas da área. Por isso, foram selecionados apenas os mapas com os resultados para ciclos de 8h, apresentado na FIGURA 7, e 1 dia.

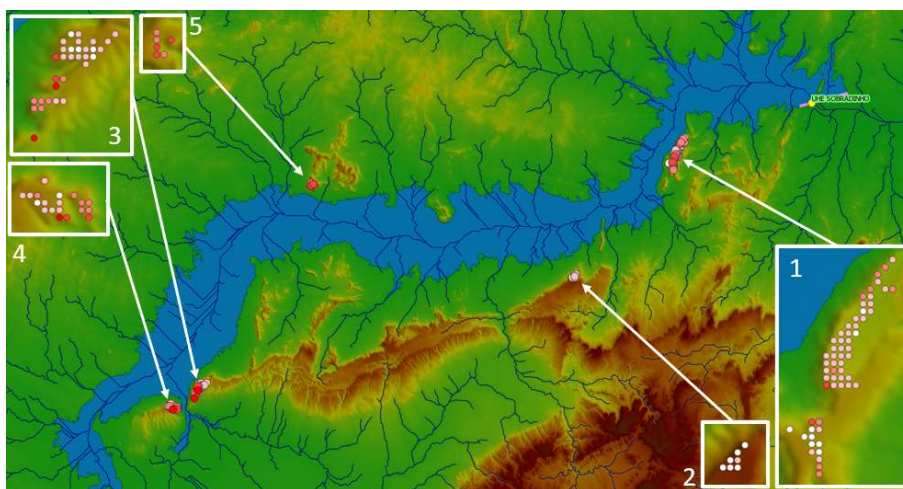


FIGURA 7 - Alternativas para UHR com 1000 MW e 8h de armazenamento (HERA - PSR, 2021)

Nesta primeira etapa, os resultados são representados por círculos coloridos segundo uma escala de cores entre o vermelho e o branco, sendo tanto mais claros quanto menor o custo. Da análise visual dos resultados dos mapas acima, verifica-se que há 5 áreas potenciais ao redor do reservatório, numeradas de 1 a 5 a partir do eixo da UHE Sobradinho no sentido horário. A área 2, localizada na margem direita, apresenta custos mais baixos (círculos mais claros), mas tem alternativas concentradas em área de grande declividade onde seria mais difícil acomodar reservatórios. Diante disso, confirmou-se o interesse na área 1, situada em região ambientalmente mais favorável e correspondente à região conhecida como Saco do Arara, antes identificada por Kelman & Harrison (2019) e estudada também por Andrade *et al.* (2020).

Para a segunda etapa, tendo em vista a vocação territorial identificada na etapa anterior, a busca pelos melhores projetos considerou as seguintes alternativas: 500 MW, 1000 MW e 1500 MW de potência e 4h, 8h, 16h 24h e 48h de tempos de geração, todas representadas no mapa da FIGURA . Nesta etapa, os resultados são representados por círculos alaranjados (reservatórios inferior e superior) conectados por uma linha tracejada amarela (circuito hidráulico). A partir dos resultados dessas simulações foram feitas análises sobre os resultados obtidos para cada componente de custo da função, por simplificação, apenas para 500 MW.

Na Tabela 1, observa-se que os custos civis (OC') acompanham a variação da elevação do barramento no Local A até a alternativa de 16h, depois voltam a cair com a mudança para o Local B. Os custos de infraestrutura (IE') dos reservatórios situados no Local A (24h e 48h) são um pouco maiores que os demais. Os custos socioambientais (SA'), são equivalentes, à exceção da alternativa de 24h, um pouco menor. Os custos unitários de armazenamento (CA) caem à medida que aumenta a capacidade de armazenamento, ficando mais clara a relevância do limite espacial para acomodação de reservatórios maiores que os simulados, que tenderiam a ser mais baratos. Por fim, os custos de instalação (CI) tendem a subir até haver a mudança do Local B para o Local A, a partir de 24h.

Tabela 1 – Análise dos componentes de custo das alternativas

P (MW)	$\Delta t$ (h)	CT (MUS\$)	OC' (MUS\$)	EQ' (MUS\$)	IE' (MUS\$)	SA' (MUS\$)	CI (US\$/MW)	CA (US\$/kWh)
500	4	248	47	159	20	23	496	124
	8	266	64	157	20	24	532	66
	12	295	92	156	20	27	590	49
	16	319	115	155	20	29	639	40
	24	292	55	200	23	14	583	24
	48	326	77	197	23	30	652	14

P = potência;  $\Delta t$  = tempo de geração; CT = custo total; OC' = custo de obras civis; EQ' = custo de equipamentos; IE' = custos de infraestrutura; SA' = custos socioambientais; CI = custo de instalação; CA = custo de armazenamento.

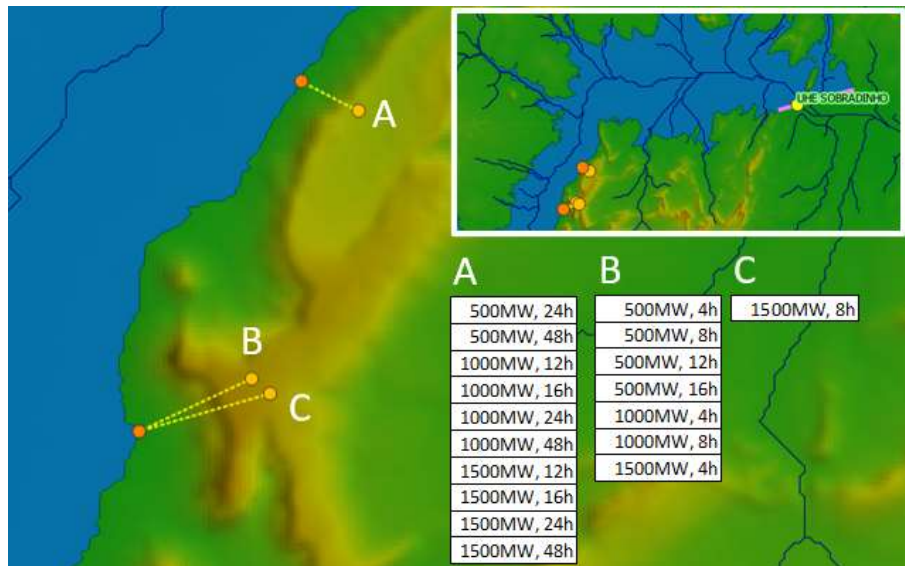


FIGURA 8 - Busca dos melhores projetos para diferentes potências e energias armazenadas.  
Fonte: Elaborado a partir do software HERA (PSR, 2021)

O modelo proposto neste estudo de caso traz algumas soluções para temas identificados como lacunas da literatura pesquisada. A introdução de uma função que reflita os custos de construção de uma UHR atende a sugestão de Rogeau *et al.* (2017) no intuito de ajudar a eliminar as alternativas mais fracas e a identificar as mais viáveis do ponto de vista econômico. O detalhamento dessa função em componentes propicia uma análise detalhada da influência desses custos na seleção das melhores alternativas. O resultado dessa análise pode indicar a necessidade de revisão de alguns critérios, com o objetivo de aprimorar os componentes de custos propostos.

As características geológicas, consideradas de forma qualitativa em outros estudos, são levadas em conta na formulação proposta como um fator de maximização dos custos das obras civis ( $K_{oc}$ ). No que se refere às questões socioambientais, é mantida a possibilidade de exclusão de alternativas com impacto direto em áreas de preservação, mas também incluído um componente de custo definido por um fator ( $K_{sa}$ ) correspondente a um percentual aplicado aos custos de obras civis, infraestrutura e equipamentos.

Outro ponto que merece destaque é a aplicação do conceito de *geomorphons* na busca de alternativas para os reservatórios a serem construídos, oferecendo uma solução mais elaborada que as apresentadas na literatura, que, por vezes, ignoram a forma geométrica.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

O modelo proposto atende ao objetivo deste trabalho ao estabelecer um procedimento de busca para selecionar locais de usinas hidrelétricas reversíveis utilizando ferramentas do SIG associadas ao conceito de *geomorphons*. Além disso, inclui uma função de custo nessas duas etapas de busca, detalhada segundo seus componentes civis, eletromecânicos, de infraestrutura e socioambientais. A aplicação da metodologia em torno do reservatório da UHE Sobradinho propiciou uma análise crítica das limitações do modelo, resultando nas recomendações relacionadas a:

- Ampliação das áreas de estudo, não só para o contínuo aprimoramento das formulações matemáticas dos componentes de custo, mas também para o refinamento dos algoritmos das citadas etapas.
- Busca por referências que permitam incluir uma parcela de equação das obras civis referente à casa de força e preços específicos de equipamentos para projetos de usinas hidrelétricas reversíveis;
- Participação maior de especialistas na definição dos coeficientes de custo e preços unitários;

- Estudo específico para definição dos níveis d'água do reservatório inferior existente, levando em conta os aspectos operativos.

Por fim, o modelo proposto não impede que avaliações subjetivas sejam realizadas e tomem parte do processo decisório. Certas particularidades, sobretudo socioambientais, podem ser levadas em conta ao longo desse processo para refletir os anseios da população a ser afetada pelas resoluções do planejamento energético e pelas obras de implantação das usinas hidrelétricas reversíveis.

## 5.0 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer os colegas do projeto de P&D “Proposição de metodologia para seleção de locais para a implantação de usinas hidrelétricas reversíveis” (PD ANEEL 00678-0120/2020) pelas discussões construtivas. Os autores agradecem também as empresas EDF Norte Fluminense, CTG Brasil, Elera e Light pelo suporte financeiro via Programa de P&D ANEEL

## 6.0 - BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, T.; KELMAN, R.; CALILI, R. F.; CUNHA, T. M.; ALBUQUERQUE, L. R. An integer programming model for the selection of pumped-hydro storage projects. PSR technical reports, 2020 (Mimeo). arXiv:2007.16036 [math.OC]. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/2007.16036.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

BARBOUR, E.; WILSON, I.A.G.; RADCLIFFE, J.; DING, Y.; LI, Y. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.61, p.421-432, 2016.

CANALES, F. A.; BELUCO, A.; MENDES, C. A. B. Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFES, v. 19, n. 2, p. 1230–1249, 2015.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Camada de Rodovias. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/map-rodo-pdf>. Acesso em: 31 ago. 2021.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Nota técnica EPE-DEE-NT-006/2019. Estudos de inventário de usinas hidrelétricas reversíveis: metodologia e resultados para o estado do Rio de Janeiro, p.1-66, Rio de Janeiro, fevereiro de 2019. Disponível em: <<https://n9.cl/xn13i>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

\_\_\_\_\_. Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, p.1-447, Brasília, 2021a. Disponível em: <<https://n9.cl/wrpm>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

\_\_\_\_\_. Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro. Webmap EPE. Disponível em: <<https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>> Acesso em: 31 ago. 2021b.

GHORBANI, N.; MAKIAN, H.; BREYER, C. A GIS-based method to identify potential sites for pumped hydro energy storage - Case of Iran. Energy, v. 169, p. 854–867, 2019.

GUITE, M.; CAPEZZALI, M.; GAUDARD, L.; ROMERIO, F.; VUILLE, F.; AVELLAN, F. Study of the drivers and asset management of pumped-storage power plants historical and geographical perspective. Energy, v. 111, p. 560-579, 2016.

HUNT, J. D.; BYERS, E.; WADA, Y.; PARKINSON, S.; GERNAAT, D. E. H. J.; LANGAN, S.; VAN VUUREN, D. P.; RIAHI, K. Global resource potential of seasonal pumped hydropower storage for energy and water storage. Nature Communications, v. 11, n. 1, p. 1-8, 2020.

IHA – INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. The World's Water Battery: Pumped Hydropower Storage and the Clean Energy Transition. IHA working paper, p.1-15, December 2018. Disponível em: <<https://n9.cl/bw9ol>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Camada de Estados, América do Sul, Capitais e Cidades. 2010. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/map-rodo-pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

IZZO, D.; BISCANI, F.; MERETA, A. Differentiable genetic programming. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), v. 10196 LNCS, p. 35–51, 2017.

JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons - a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. Geomorphology, v. 182, p. 147–156, 2013.



JRC – JOINT RESEARCH CENTRE. Strategic Energy Technology Information System (SETIS) expert workshop on the assessment of the potential of pumped hydropower storage. Report EU 25367 EN. JRC Technical Reports. European Commission, April 2012. Disponível em: <<https://n9.cl/mi827>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

KELMAN, R.; HARRISON, D. L. Integrating Renewables with Pumped Hydro Storage in Brazil: a Case Study. HAL archives-ouvertes.fr, HAL Id: hal-02147740, p.1-23, 2019.

LIAO, W. H. Region description using extended local ternary patterns. Published in 2010 20th International Conference on Pattern Recognition, Istanbul, Turkey, p.1003-1006, August 2010. Anais de Congresso. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5595845>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

LU, B.; STOCKS, M.; BLAKERS, A.; ANDERSON, K. Geographic information system algorithms to locate prospective sites for pumped hydro energy storage. Applied Energy, v. 222, p. 300–312, 2018.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Mapa geológico do estado da Bahia. Versão 1.1. Atualização Maio 2003. Disponível em: <<https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>> Acesso em: 31 ago. 2021.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Unidades de Conservação. Áreas Especiais. Download de dados geográficos. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>> Acesso em: 31 ago. 2021.

\_\_\_\_\_. Biodiversidade. Ambiente físico e biodiversidade. Download de dados geográficos. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>> Acesso em: 31 ago. 2021.

NZOTCHA, U.; KENFACK, J.; BLANCHE MANJIA, M. Integrated multi-criteria decision-making methodology for pumped hydro-energy storage plant site selection from a sustainable development perspective with an application. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 112, n. May, p. 930–947, 2019.

PSR – Soluções e Consultoria em Energia Ltda. Hydropower and Environmental Resources Assessment (HERA). Ferramenta computacional. Versão 1.3.1-dev18, agosto de 2021.

REHMAN, S.; AL-HADHRAMI, L. M.; ALAM, M. M. Pumped hydro energy storage system: A technological review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 44, p. 586–598, 2015.

ROGEAU, A.; GIRARD, R.; KARINIOTAKIS, G. A generic GIS-based method for small Pumped Hydro Energy Storage (PHES) potential evaluation at large scale. Applied Energy, v. 197, p. 241–253, 2017.

SOARES-FILHO B.S.; RAJÃO R.; MERRY F.; RODRIGUES H.; DAVIS J.; LIMA L.; MACEDO M.; COE M.; CARNEIRO A.; SANTIAGO L. Brazil's Market for trading forest certificates. Plos One 11(4):e0152311. 2016. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0152311>> Acesso em: 31 ago. 2021.

SOHA, T.; MUNKACSY, B.; HARMAT, A.; SZABÓ, M. GIS-based assessment of the opportunities for small-scale pumped hydro energy storage in middle-mountain areas focusing on artificial landscape features. Energy, v. 141, p. 1363–1373, 2017.

YAMAZAKI, D.; IKESHIMA, D.; SOSA, J.; BATES, P. D.; ALLEN, G. H.; PAVELSKY, T. M. MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. Water Resources Research, v. 55, n. 6, p. 5053–5073, 2019.

YAMAZAKI, D.; IKESHIMA, D.; TAWATARI, R.; YAMAGUCHI T.; O'LOUGHLIN F.; NEAL, J. F.; SAMPSON, C. C.; KANAE, S.; BATES, P. D. A high-accuracy map of global terrain elevations. Geophysical Research Letters, v. 44, n. 11, p. 5844–5853, 2017.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



### (1) LUIZ RODOLPHO SAURET CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE

Luiz Rodolpho Albuquerque, graduado *cum laude* em Engenharia Civil pela UFRJ, em 1996, é mestrando em Engenharia Urbana e Ambiental pela PUC-Rio e tem 22 anos de experiência em projetos hidrelétricos no Brasil e na América Latina. Na PCE Engenharia, a partir de 1998, trabalhou em diversos estudos, inclusive como coordenador. Em 2012, assumiu a chefia adjunta do departamento de inventários e viabilidade. Desde 2015, como consultor da PSR, contribui para desenvolver o módulo de engenharia do HERA - ferramenta computacional para planejamento hidrelétrico de bacias hidrográficas. Atualmente, faz parte da equipe de um projeto de P&D sobre usinas reversíveis.

### (2) RAFAEL KELMAN

Graduado em Engenharia Civil pela UFRJ, MSc em Recursos Hídricos e DSc em Engenharia de Sistemas com ênfase em otimização pela COPPE/UFRJ. Professor convidado do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Ingressou na PSR em 1997, onde desde 2008 é Diretor-Executivo. Coordena estudos nas áreas de recursos hídricos e energia e o desenvolvimento de modelos computacionais. Ex-diretor técnico da Associação

Brasileira de Recursos Hídricos. Consultor do Banco Mundial, BID, IFC e outras instituições, com experiência profissional em mais de trinta países. Palestrante e instrutor em cursos e seminários e autor de diversos artigos e capítulos de livros.

(3) RODRIGO FLORA CALILI

Rodrigo Flora Calili atualmente é professor adjunto do Programa de Pós-Graduação em Metrologia e do Mestrado Profissional de Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Tem Pós-doutorado em Metrologia pela PUC-Rio (2016), é Doutor em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio (2013) com ênfase em Sistemas de Energia. Durante o ano de 2012 durante o doutorado esteve *na École de Mines de Paris*. É mestre em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio (2006) com ênfase Métodos e Apoio à Decisão e graduado em Engenharia Elétrica pela UFJF (2003). Atua como consultor e pesquisador em diversos projetos de empresas setor elétrico.

(4) TAINÁ MARTINS CUNHA

Tainá Martins é graduada em Eng. Ambiental pela Univ. Federal Fluminense, com mestrado no Programa de Eng. Civil da COPPE / UFRJ, onde pesquisou a aplicação de sensoriamento remoto em modelagem hidrológica. Ingressou na PSR em 2014, atuando em estudos energéticos, hidrológicos e ambientais, *due diligence*, estudos de interconexão elétrica regional, aplicação de geotecnologias para avaliação de potencial hidrelétrico de bacias hidrográficas, planejamento hidrelétrico sustentável e uso de dados de reanálise para simulação de produção de renováveis (solar e eólica). Trabalhou com gestão ambiental na Vale, e investigação de passivos ambientais e remediação de áreas contaminadas na BfU do Brasil.