



## MODELO PARA SELEÇÃO DE LOCAIS PARA A IMPLANTAÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS: UMA ABORDAGEM QUE COMBINA ALGORITMO DE GEOPROCESSAMENTO COM ENGENHARIA

Luiz Rodolpho Sauret Cavalcanti de Albuquerque<sup>1,2</sup>; Rodrigo Flora Calili<sup>2</sup>; Rafael Kelman<sup>1</sup>;  
Marcelo Metello<sup>1</sup>; Tainá Martins Cunha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PSR; <sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

### RESUMO

A crescente participação de fontes renováveis variáveis nos últimos anos torna cada vez mais relevante a busca por recursos energéticos capazes de aumentar a flexibilidade operacional dos sistemas elétricos. Nesse contexto, Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) surgem como uma solução interessante. O artigo apresenta um modelo para identificação de locais adequados para UHR, cuja formulação busca minimizar os seus custos de construção com auxílio de ferramentas do Sistema de Informações Geográficas, inspiradas no conceito de *geomorphons*. Após o detalhamento de equações de custos de obras civis, a aplicabilidade do modelo é demonstrada em torno de um reservatório existente. Por fim, os resultados indicam a seleção de candidatos de UHR como recurso econômico em um modelo de planejamento integrado de recursos que otimiza a expansão do Sistema Interligado Nacional.

**Palavras-chave:** Usina hidrelétrica reversível; Armazenamento de energia; Geração de energia renovável; Avaliação de potencial; Sistema de informações geográficas.

### ABSTRACT

The growth of variable renewable energy sources in recent years has increased the relevance of resources that can increase the operative flexibility of power systems. In this context, Pumped Storage Hydropower plants (PSH) emerge as an interesting solution. The article presents a model that identifies suitable locations for PSH, whose formulation minimizes engineering construction costs



with the use of GIS tools, inspired on the concept of geomorphons. After detailing cost equations related to civil works, a case study demonstrates the application in the vicinity of an existing reservoir. Finally, the results indicate PSH candidates being selected as an economic resource in an integrated resource planning model that optimizes the Brazilian National Interconnected System expansion.

**Keywords:** Pumped storage; Energy storage; Renewable energy generation; Potential assessment; Geographic Information System.

## 1. INTRODUÇÃO

No contexto da expansão do uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica, como o vento e a irradiação solar, a natureza intermitente e sazonal dessas alternativas pode afetar a operação do sistema elétrico (Canales *et al.*, 2015). Uma das soluções para equilibrar a produção com a demanda do sistema se dá através do armazenamento de energia. Neste cenário, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) são a tecnologia de larga escala mais empregada, com boa eficiência operativa, tempo de resposta mais rápido e vida útil mais longa que alternativas de armazenamento (Rehman *et al.*, 2015).

As diretrizes que orientaram a maior parte das pesquisas recentes foram organizadas em relatório técnico do *Joint Research Center* (JRC, 2012). No entanto, lacunas teóricas foram percebidas nas principais iniciativas (Rogeanu *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2018; EPE, 2019; Hunt *et al.*, 2020), que deixam de considerar um ou mais dos seguintes aspectos: critérios ambientais além de restrições, características geológicas e custos. Esses temas foram integrados no modelo para seleção de locais de UHR apresentado por Albuquerque (2021).

O objetivo do presente trabalho, além de detalhar as formulações propostas no modelo mencionado, é aprofundar a discussão dos resultados obtidos, comparando-os a análises de inserção de UHR no Sistema Interligado Nacional (SIN). Esses estudos vêm sendo realizados no âmbito de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em execução sobre o tema (PSR, 2021), sendo uma extensão dos trabalhos apresentados por Albuquerque *et al.* (2022) e por Andrade *et al.* (2022).



## 2. MODELO PARA SELEÇÃO DE UHR BASEADO EM SIG

O modelo proposto por Albuquerque (2021) procura definir uma formulação que, utilizando ferramentas do SIG, busque minimizar os custos de construção de uma UHR. Seus conceitos básicos são resumidos adiante.

### 2.1 O conceito de *geomorphons* aplicados à triagem de locais

*Geomorphons* são as microestruturas mais básicas da paisagem que podem ser extraídas de um Modelo Digital de Elevação (MDE) com baixo custo computacional. Segundo Jasiewicz & Stepinski (2013), trazem vantagens para a classificação das formas de relevo, pois são sustentados por princípios de visão de máquina e permitem o trabalho simultâneo em várias escalas, mostrando-se robusto e eficiente, já que dispensa cálculos complexos.

Na busca de locais para UHR, o conceito de *geomorphons* permite identificar formas no relevo que minimizem a necessidade de fechamento de selas topográficas para a formação dos reservatórios.

O método consiste em considerar  $n$  direções a partir de um ponto central e traçar perfis longitudinais para diversas alturas (Figura 1). Por meio desse procedimento, curvas de cota, volume e custo podem ser definidas em diversos locais. E assim, pode se obter alternativas, hierarquizadas segundo seus custos, conforme as necessidades de armazenamento do sistema em estudo.

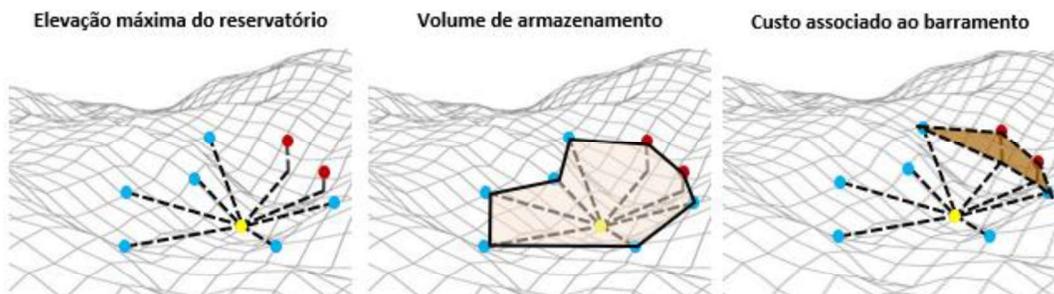


Figura 1 – Definição das curvas cota, volume e custo dos reservatórios



## 2.2 Definição das equações básicas dos componentes de custo

Os quatro principais componentes de custo para implantação de uma UHR são: *SA* – impactos socioambientais, *OC* – obras civis, *EQ* – equipamentos eletromecânicos e *IE* – conexão elétrica e viária. Uma quinta parcela, *OT* – outros custos, inclui valores indiretos e outros não considerados pelas simplificações propostas nas formulações. O custo total de cada alternativa (*CT*) resulta da soma dos componentes anteriores, cujas equações são apresentadas em Albuquerque (2021), Albuquerque *et al.* (2022) e Andrade *et al.* (2022), tendo sido considerados, em cada caso, custos unitários e coeficientes específicos.

Para a presente análise, a equação do componente de obras civis (*OC*) foi revista e detalhada. Neste caso, passaram a ser consideradas a variação da espessura da blindagem do conduto, em função da queda hidráulica, além de um termo específico para o custo da casa de força. A nova equação (1), a seguir, mantém as variáveis de altura do barramento  $h(x)$ , vazão de bombeamento ou geração ( $Q$ ) e extensão do circuito de adução ( $L_{hid}$ ), mas introduz tanto a variável de queda disponível ( $H$ ), quanto coeficientes que relacionam volumes de escavação e concreto da casa de força com a queda da usina ( $K_{xc}$  e  $K_{cf}$ , respectivamente). A equação do volume de concreto utilizada, por sua vez, foi obtida do Manual de Inventário de hidrelétricas convencionais (CEPEL, 2007).

$$OC = K_{oc} \left\{ 10 \int_0^{L_{hid}} [4 + 2,5h(x)]h(x)dx + (30 + 0.21H)L_{hid}Q + (300 + 120 \times K_{xc}) \times (K_{cf} \times 485 \times e^{0,123 \times Q^{0,5}}) \right\} \quad (1)$$

Os demais componentes, inclusive equipamentos eletromecânicos, originalmente definidos por Andrade *et al.* (2022), permaneceram inalterados.

## 3. DEMONSTRAÇÃO DE APLICABILIDADE DO MODELO PROPOSTO

Para essa demonstração, foi utilizado o modelo computacional HERA (PSR, 2021), em sua versão desenvolvimento para inclusão de projetos de UHR, dentro do contexto do mencionado projeto de P&D (PSR, 2020).



Na preparação da base de dados da aplicação apresentada adiante, foram utilizadas as mesmas camadas de informação, bem como as classificações dos impactos socioambientais e da qualidade da rocha de Albuquerque *et al.* (2022).

### 3.1 Aplicação do modelo e apresentação dos resultados

As simulações em torno da UHE Sobradinho tiveram o objetivo de encontrar um reservatório superior para formar uma UHR com o lago existente. Em uma primeira etapa, foram simuladas alternativas de tempos de geração para uma potência de 1000 MW, comparável ao desta usina. Neste caso, o modelo encontrou apenas resultados para armazenamento de 8h e 1 dia, indicando haver um limite físico ditado pelas características geomorfológicas da área.

Na Figura 2 (PSR, 2021), há 3 áreas potenciais identificadas, numeradas no sentido horário. Tendo em vista que, na escala de cores entre o branco e o vermelho, quanto mais claros os círculos, menor o custo, a área 1, conhecida como Saco do Arara, se mostrou a mais promissora delas.

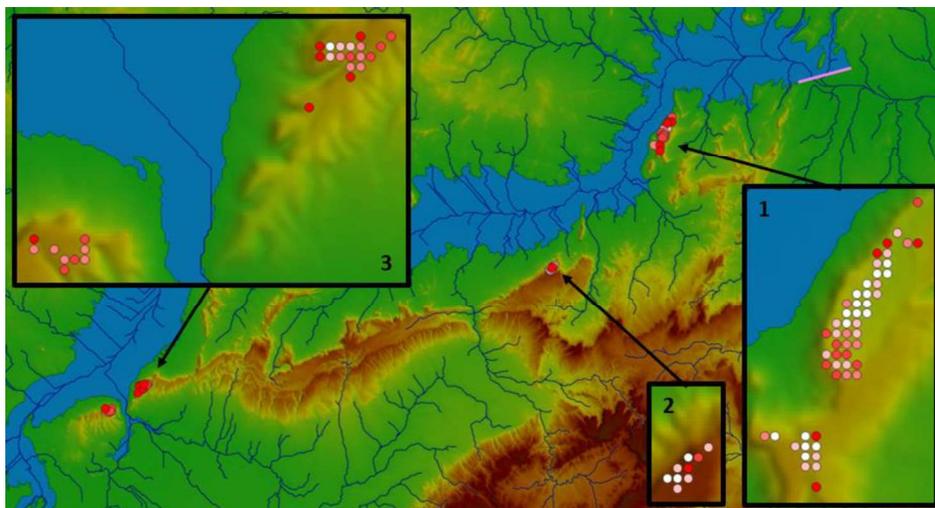


Figura 2 – Alternativas para UHR de 1000 MW e 8h

Em seguida, a segunda etapa da aplicação do modelo consistiu na busca pelos melhores projetos na área do Saco do Arara para combinações de



## XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

### Os desafios do Planejamento Energético

24 a 26 de agosto de 2022

alternativas de armazenamento com potências entre 100 MW e 1000 MW, e tempos de geração de 4h a 48h. Na Figura 3 (PSR, 2021), as UHR selecionadas são representadas por círculos alaranjados (reservatórios) conectados por uma linha tracejada amarela (circuito hidráulico).

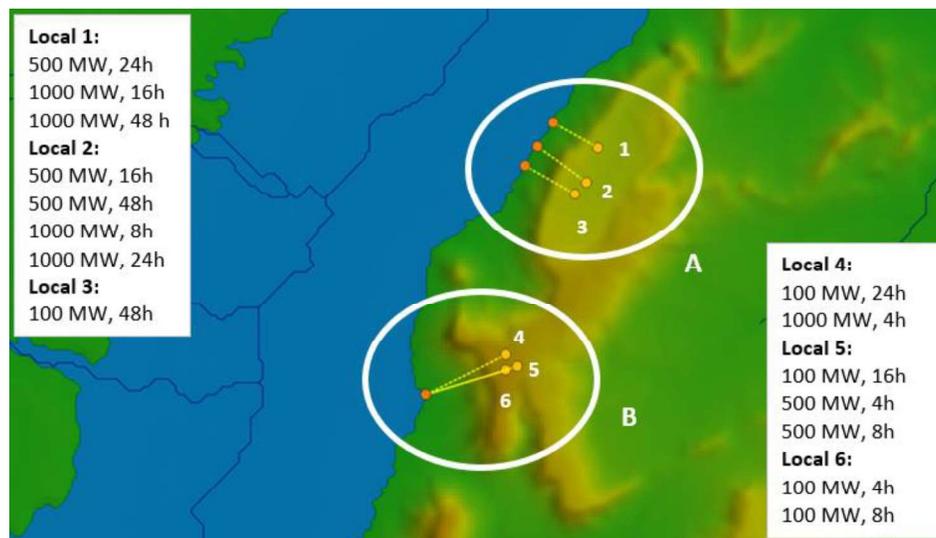


Figura 3 – Busca dos melhores projetos para diversas alternativas na Área 1

Na Tabela 1, são apresentados os resultados obtidos para a potência de 500 MW, segundo alternativas de armazenamento definidas pelos tempos de geração considerados ( $\Delta t$ , em horas). Os custos de cada componente são detalhados conforme a seguir: *OC* (obras civis); *EQ* (equipamentos); *IE* (infraestrutura); *SA* (custos socioambientais); *OT* (outros custos); e *CT* (custo total). Observa-se que os custos unitários de armazenamento (*CA*) caem com a capacidade, o que expõe um ganho de escala importante em relação às baterias, enquanto os custos de instalação (*CI*), ao contrário, tendem a subir.



# XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

## Os desafios do Planejamento Energético

24 a 26 de agosto de 2022

Tabela 1 – Análise dos componentes de custo das alternativas para 500 MW (em US\$ milhões)

$\Delta t$	OC	EQ	IE	SA	OT	CT	CI	CA
4	66,16	157,46	23,17	8,11	101,96	356,9	714	178
8	87,73	155,91	25,18	8,13	110,78	387,7	775	97
16	59,78	196,81	13,30	9,33	111,69	390,9	782	49
24	65,79	200,34	13,78	9,44	115,73	405,1	810	34
48	87,96	195,89	14,66	9,36	123,15	431,0	862	18

No caso da parcela do componente de obras civis (OC) referente ao barramento do reservatório superior (RS), a relação direta entre a capacidade de armazenamento (S) e os custos é afetada pela topografia. Conforme Tabela 2, os custos relativos ao volume útil necessário (RS/VU) na área A, situada em depressão natural do terreno, são menores que em B.

Tabela 2 – Parcela do componente de custo de obras civis (OC) correspondente ao barramento do reservatório superior (RS) das alternativas de armazenamento para 500 MW

$\Delta t$	Área	S (MWh)	Volume Útil – VU (hm <sup>3</sup> )	RS (USD milhões)	RS/VU (USD mi/hm <sup>3</sup> )
4	B	2.000	2,96	20,23	6,83
8	B	4.000	5,80	42,65	7,35
16	A	8.000	19,35	29,36	1,52
24	A	12.000	30,65	33,32	1,09
48	A	24.000	58,63	57,49	0,98

A variação dos custos do componente de equipamentos (EQ) é proporcional à potência (em MW). Para uma mesma potência, os custos sofrem influência direta da queda disponível (H) na área selecionada pelo modelo. Esse comportamento se verifica também na parcela de custos da casa de força (CF) do componente de obras civis. Conforme Tabela 3, quando a queda diminui, esses custos (EQ e CF) aumentam.

O inverso acontece com os custos do circuito hidráulico de adução (CH). Neste caso, as extensões do túnel de adução (L) no Local B são pelo menos cerca de 40% maiores que em A. Além disso, o fato de as quedas (H) serem



maiores resultam em vazões e áreas de escoamento menores, mas aumentam o custo da blindagem, o que parece refletir o detalhamento da equação do componente OC proposto neste trabalho.

Tabela 3 – Componente de custo de equipamentos (EQ) e da parcela correspondente à casa de força (CF) das alternativas de armazenamento para 500 MW

$\Delta t$	Área	H (m)	L (m)	EQ (USD milhões)	CF (USD milhões)	CH (USD milhões)
4	B	297	1,9	157,46	2,61	43,32
8	B	303	1,9	155,91	2,57	42,51
16	A	181	1,3	196,81	3,94	26,48
24	A	172	1,2	200,34	4,10	28,37
48	A	180	1,3	195,89	3,90	26,57

### 3.3 Discussão dos resultados

As tendências de comportamento dos custos de cada componente analisado neste trabalho (barramento do reservatório superior, circuito hidráulico, obras civis da casa de força e equipamentos) se mostram coerentes com as características físicas e energéticas dos locais selecionados.

Sobre os resultados apresentados, observa-se também que os custos de implantação (CI) das alternativas de UHR para a potência de 100 MW calculados neste trabalho estão entre USD 978/kW e USD 1.035/kW. Portanto, são inferiores àqueles identificados pelo IHA (2021) para baterias de íon-lítio para a mesma potência e tempos de geração correspondentes a 4h (USD 1.541/kW) e 8h (USD 3.565/kW) referentes a 2020.

Além disso, nas análises relacionadas à inserção de UHR no SIN para um horizonte de planejamento de 20 anos, realizadas dentro do contexto do projeto de P&D mencionado (PSR, 2020), percebeu-se inicialmente a preferência do modelo de otimização (PSR, 2022) de selecionar para a expansão do SIN usinas com 24h de armazenamento em algumas regiões.

Sendo assim, em seguida, buscou-se verificar se a preferência do sistema por usinas de menor capacidade se confirmava para projetos entre 4h e



24h, utilizando custos de investimento dos projetos obtidos em torno do reservatório de Sobradinho, cujos resultados apresentam vocação para projetos dessa ordem. Estas simulações indicaram a seleção por projetos de UHR com capacidade de armazenamento ainda menor, da ordem de 4h.

#### 4. CONCLUSÃO

O modelo proposto atende ao objetivo de estabelecer um procedimento de busca para selecionar locais adequados para implantação de UHR, minimizando os seus custos de construção por meio de formulações específicas, com o auxílio de ferramentas do SIG, inspiradas no conceito de *geomorphons*.

O detalhamento do componente de obras civis, conforme proposto no presente trabalho, propiciou uma análise mais detalhada da relação entre as características físicas e energéticas dos locais selecionados e os custos obtidos pelo modelo. Essa avaliação apresentou resultados coerentes com o esperado.

Os resultados obtidos em torno da UHE Sobradinho permitiram comparações com custos de outras tecnologias alternativas de armazenamento (baterias de íon-lítio) que indicam vantagens na opção pela UHR, bem como parecem oferecer candidatos potenciais para atender às necessidades do SIN.

O modelo é extensível a outros arranjos de engenharia (por exemplo, UHR em ciclo fechado), em terrenos com condições geomorfológicas distintas. As funções de cada componente de custo podem ser aprimoradas com pesquisas específicas, por exemplo, sobre os preços de equipamentos de UHR, considerando a pouca experiência de projetos desse tipo no Brasil. Neste sentido, a validação dos valores utilizados para custos unitários e coeficientes nas formulações propostas a partir de informações de usinas já construídas parece adequada.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, L. R. Modelo para seleção de locais para a implantação de usinas hidrelétricas reversíveis: uma abordagem baseada em sistema de



## XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

### Os desafios do Planejamento Energético

24 a 26 de agosto de 2022

informação geográfica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental. PUC-Rio, 139 p. Rio de Janeiro, 2021.

ALBUQUERQUE, L. R.; KELMAN, R.; CALILI, R. F.; CUNHA, T. Identificação de locais para a construção de usinas hidrelétricas reversíveis. Informe Técnico. XVII SNPTEE, 2022 (Mimeo).

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. *Water Resources Research*, 58, 2022.

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 – UFSM*, v. 19, n. 2, p. 1230–1249, 2015.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas. p. 1-684, Projeto Estal, dezembro de 2007.

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, 2019.

\_\_\_\_\_. Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, p.1-447, Brasília, 2021a.

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. Pumped Storage Hydropower Capabilities and Costs. PSH International Forum. Capabilities, Costs and Innovation Working Group. September 2021.

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



## XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

### Os desafios do Planejamento Energético

24 a 26 de agosto de 2022

JRC – JOINT RESEARCH CENTER. 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, 2012.

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.

PSR – Soluções e Consultoria em Energia Ltda. OptGen. Ferramenta computacional. Versão 7.4.49. 2022.

\_\_\_\_. Soluções e Consultoria em Energia Ltda. HERA. Ferramenta computacional. Versão 1.3.1-dev18, agosto de 2021.

\_\_\_\_. Proposição de metodologia para seleção de locais para a implantação de usinas hidrelétricas reversíveis. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, n. PD-00678-0120/2020. Patrocinado pelas subsidiárias da EDF, CTG, ELERA além da LIGHT. Em elaboração para ANEEL, 2020.

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.

ROGÉAU, 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.

