



Relatório 2

Descrição da Metodologia de Mapeamento de UHR no Brasil

Julian Hunt
Nivalde de Castro
Roberto Brandão
Ana Carolina Chaves

Outubro de 2020

LISTA DE TABELAS

Tabela

Tabela 1: Descrição dos dados e métodos aplicados no modelo.	12
Tabela 2: Descrição dos estágios do modelo de mapeamento de UHR no Brasil.	25
Tabela 3: Variação de parâmetros utilizados para o desenvolvimento dos projetos de UHR.	26
Tabela 4: Premissas, incertezas, limitações e possível aprimoramento do modelo.....	29
Tabela 5: Propostas de aprimoramento no modelo computacional de mapeamento do potencial de UHR no Brasil.	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do modelo de potencial Brasileiro de UHR.	9
Figura 2: Exemplo de representação de uma rede Strahler.	10
Figura 3: Estimativa do custo de barragens das UHR.	14
Figura 4: Estimativa de custo da escavação dos túneis com a tecnologia “drill and blast”.	15
Figura 5: Estimativa de custo da tubulação pressurizada e da construção civil.	16
Figura 6: Estimativa de custo da tubulação embutida de metal.	17
Figura 7: Estimativa de custo da escavação da casa de força da UHR.	18
Figura 8: Estimativa de custo para turbinas Francis.	19
Figura 9: Estimativa de custo de equipamentos auxiliares.	20
Figura 10: Estimativa de custo de equipamentos elétricos (sem incluir o gerador).	21
Figura 11: Estimativa de custo do gerador.	22
Figura 12: Cálculo da razão entre a queda mínima da UHR (m) e o comprimento da tubulação (km) (Q/T).	27
Figura 13: Mapa topográfico utilizado no modelo descrito nesse relatório, dividido em blocos 5x5 graus de latitude e longitude.	41
Figura 13: Potencial de UHR Sazonal na Região Sul do Brasil.	42
Figura 13: Potencial de UHR Sazonal na Região Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.	42
Figura 13: Potencial de UHR Sazonal na Região Nordeste e Norte do Brasil.	43
Figura 13: Potencial de UHR Diária e Semanal na Região Sul do Brasil.	43
Figura 13: Potencial de UHR Diária e Semanal na Região Sudeste do Brasil.	44
Figura 13: Potencial de UHR Diária e Semanal na Região Nordeste do Brasil.	44

Sumário

1. Introdução.....	5
2. Metodologia: Modelagem Computacional de UHR no Brasil.....	7
2.1 Adaptação de Modelo Existente	7
2.2 Descrição Metodológica	7
2.3 Dados Utilizados	10
2.4 Modelo de seleção de local e projeto de engenharia	23
2.5 Dimensionamento e custo de armazenamento	27
2.6 Sugestões de Melhorias para o Modelo no Futuro	36
3. Considerações Finais.....	37
Referências Bibliográficas.....	37
Anexo 1 - Mapeamento de todos os projetos de UHR	41

Abreviações

AREMI	Australian Renewable Energy Mapping Infrastructure
GRIN	Global River Network
O&M	Operation and Management
PUA	Point Under Analysis
PCR-GLOBWB	PCRaster Global Water Balance
UHR	Usinas hidrelétricas reversíveis
UHRS	Usinas hidrelétricas reversíveis sazonais
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SPHS	Seasonal Pumped-Hydro Storage

1. Introdução

Uma série de tecnologias de armazenamento energético vem sendo desenvolvida para gerenciar redes de eletricidade, entretanto, a maioria destas cumpre apenas ciclos de curto prazo (diários ou mais curtos). Os sistemas de armazenamento de usinas hidrelétricas reversíveis (UHR) são atualmente o método mais maduro e difundido para armazenamento de eletricidade de curto e longo prazo com capacidade instaladas acima da 1 GW (International Energy Agency 2014; Rehman, Al-Hadhrami, and Alam 2015; USA Department of Energy and Sandia National Laboratories 2019; International Renewable Energy Agency (IRENA) 2019; International Hydropower Association 2019; Kelman and Harrison 2019).

Frequentemente, a UHR é vista como uma tecnologia capaz de armazenar energia para ciclos diários, semanais e mensais (International Electrotechnical Commission 2011; Renewable Energy Association 2016; Akhil et al. 2013; World Energy Council 2016; Luo et al. 2015; International Energy Agency 2015). No entanto, esta tecnologia também pode operar em ciclos anuais e plurianuais (J. Hunt et al. 2018). Dada a atual redução de custos de outras tecnologias que oferecem armazenamento diário de energia com baterias, prevê-se que a UHR ganhe importância como alternativa de armazenamento energético e hídrico, semanal, mensal e sazonal.

Uma planta de UHR com ciclo sazonal (UHRS) consiste em um reservatório de armazenamento de variação de queda elevada construído em paralelo a um grande rio. Durante os períodos de baixa demanda de energia ou alta disponibilidade de água, a água é bombeada para o reservatório. Quando é necessária capacidade adicional de geração de eletricidade ou a água é escassa, a água armazenada é liberada do reservatório gerando eletricidade. Desta forma, as UHRS podem ser comparadas às barragens de reservatório convencionais, devido à possibilidade de regular a vazão do rio e aumentar a geração hidrelétrica nas UHE em cascata (J. D. Hunt, Freitas, and Pereira Junior 2014).

As UHRS têm requisitos de terra muito menores do que as barragens hidrelétricas convencionais, para um potencial comparável de armazenamento energético e hídrico, isto porque o projeto do reservatório fora do rio permite maiores variações de carga hidráulica (J. Hunt et al. 2018). A UHRS também pode ser atraente para lidar com problemas de carga emergentes do consumo de eletricidade e variações sazonais de abastecimento devido ao uso de fontes intermitentes de geração, assim como pode ajudar a superar problemas de escassez de água. Ademais, haja vista que o armazenamento não está em um rio principal, os possíveis impactos negativos da energia hidrelétrica podem ser melhor gerenciados.

Para entender o potencial que as UHR e UHRS podem cumprir em requisitos futuros de armazenamento energético, neste relatório, apresentamos a primeira avaliação de abrangência nacional consistente do potencial de UHR. O modelo computacional utilizado é uma atualização dos métodos que foram usados para estimar o potencial hidrelétrico global (Gernaat et al. 2017; Zhou et al. 2015; Hoes et al. 2017; Petheram, Gallant, and Read 2017; van Vliet et al. 2016; Rogeau, Girard, and Kariniotakis 2017), principalmente o modelo para previsão de UHRS que foi desenvolvido por um dos membros do grupo de pesquisa desse projeto (J. Hunt et al. 2020).

Outro estudo recente que investiga o potencial global para UHR e assume a construção de dois reservatórios em *Closed Loop* para operação diária e semanal é o AREMI, desenvolvido para o governo australiano (Lu et al. 2018; Stocks et al. 2019). Eles encontraram um potencial global de 23×10^6 GWh em mais de 600.000 plantas, mas os tamanhos do projeto parecem ser impraticáveis ou inviáveis para o armazenamento sazonal ou armazenamento hídrico, além de não incluírem análise detalhada de custos ou disponibilidade hídrica. Outros estudos têm sido desenvolvidos para encontrar o potencial de projetos de UHR na Europa (Lacal-Arántegui, Fitzgerald, and Leahy 2012; Rogeau, Girard, and Kariniotakis 2017; Gimeno-Gutiérrez and Lacal-Arántegui 2015) e no Irã (Ghorbani, Makian, and Breyer 2019), porém, estes são modelos regionais e também não incluem custos.

Neste relatório, examinamos a topografia brasileira ao longo dos rios em busca de locais atraentes para construir reservatórios artificiais para fins de armazenamento hídrico e energético com usinas UHR. Aqui, avaliamos todos os pontos de topografia para adequação do projeto a uma resolução de 15 segundos (resolução de aproximadamente 450 m), usando uma metodologia de avaliação de localização detalhada para desenvolver e custear projetos de UHR com topografia, rede de rios e dados hidrológicos.

Posto isto, o presente relatório tem como objetivo central apresentar o potencial de UHR no Brasil. Para tal, foi desenvolvida uma metodologia que envolve uma modelagem computacional com uso de mapas topográficos e hidrológicos do Brasil associados a um algoritmo capaz de desenvolver projetos de UHR e estimar custos de construção e custos de armazenamento energético e hídrico.

O Brasil tem um grande potencial para construção de UHR de diferentes tipos de arranjos e ciclos de armazenamento. Esse relatório dividiu o potencial de UHR em diferentes arranjos, segundo seus respectivos benefícios para o setor elétrico brasileiro. Os tipos de UHR abordados nesse relatório são: as UHR diária e semanal; UHR mensais, sazonais e plurianuais.

Nas seções a seguir, é apresentado o detalhamento de cada um desses tipos de UHR, junto com a metodologia utilizada no mapeamento do potencial de cada arranjo. As UHR com ciclo diário, semanal, mensal, sazonal e plurianual

utilizam uma metodologia baseada em um modelo computacional que detalha vários projetos de UHR no Brasil.

2. Metodologia: Modelagem Computacional de UHR no Brasil

2.1 *Adaptação de Modelo Existente*

A metodologia utilizada para mapear o potencial de armazenamento energético no Brasil com UHR diárias, semanais, mensais e sazonais é baseada em (J. Hunt et al. 2020). A metodologia e modelo computacional em (J. Hunt et al. 2020) foram implementadas com o intuito de estimar o potencial de UHR sazonal no mundo. Ajustes foram feitos para melhorar a implementação do modelo no Brasil e para estender a sua aplicabilidade para projetos de UHR com ciclos diários, semanais, mensais e sazonais.

2.2 *Descrição Metodológica*

Para avaliar o potencial de UHR, nossa metodologia integra cinco componentes críticos, que são: i) topografia; ii) rede fluvial ; iii) dados de hidrologia; iv) estimativa de custos de infraestrutura; e v) otimização de projeto da UHR. A adequação do projeto da UHR depende principalmente da topografia, distância ao rio e disponibilidade de água, que juntos determinam o potencial técnico. Fatores contextuais adicionais, como a distância da demanda de energia e as perdas de infraestrutura de transmissão e custos associados, determinam a viabilidade econômica. Como o potencial de armazenamento e os custos de infraestrutura são altamente dependentes da topografia, a abordagem aplicada neste relatório identifica, espacialmente, vários locais candidatos viáveis tecnicamente, fornecendo suas estimativas de custos.

Os detalhes de metodologia implementada são explicados, passo a passo, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e nas 1 e

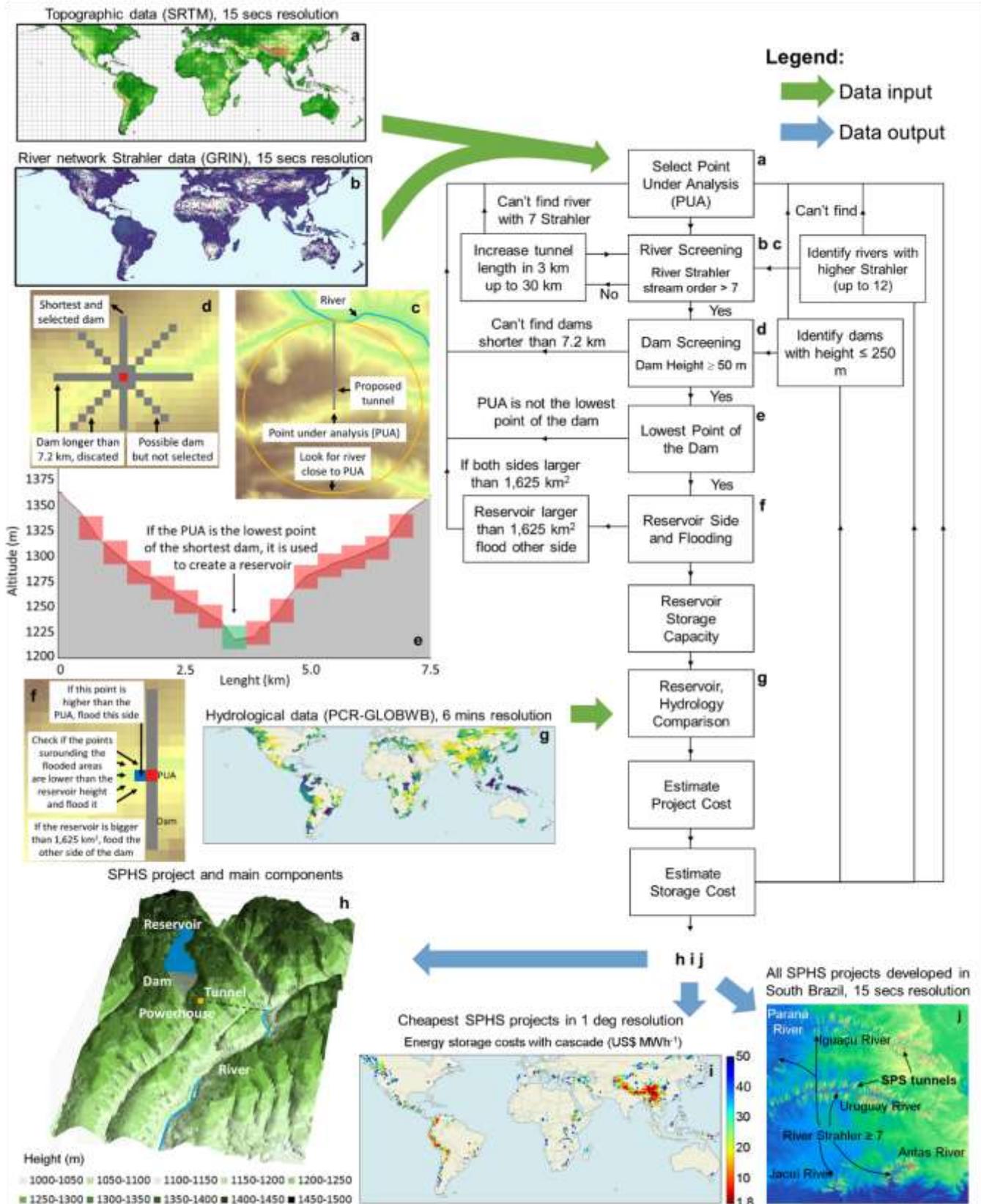
Tabela 2. O modelo passa por cada pixel em uma resolução de 15 segundos, implementando uma avaliação de localização detalhada, que leva em conta a topografia e hidrologia no cálculo de custos de cada projeto. As etapas executadas são descritas a seguir:

- **Primeiro passo:** localização de um rio com vazão razoável até 20 km de distância do ponto em análise (**Erro! Fonte de referência não encontrada.c**);
- **Segundo passo:** verificar se uma barragem de até 260 m de altura pode ser construída a partir do pixel em análise (**Erro! Fonte de referência não encontrada.d**);
- **Terceiro passo:** remover projetos com barragens concorrentes com o objetivo de reduzir o tempo de interação do modelo;
- **Quarto passo:** desenvolver projetos de barragem onde o ponto em análise é o ponto mais baixo da barragem (**Erro! Fonte de referência não encontrada.e**);
- **Quinto passo:** encontrar o lado inundado da barragem e criar o reservatório (**Erro! Fonte de referência não encontrada.f**);
- **Sexto passo:** calcular o volume e áreas inundadas, comparar o tamanho do local de armazenamento com a água disponível para armazenamento (**Erro! Fonte de referência não encontrada.g**);
- **Sétimo passo:** estimar os custos de barragem, túnel, turbina, gerador, escavação e terreno e estimar os custos de armazenamento hídrico e energético (**Erro! Fonte de referência não encontrada.i**).

A Figura 1 apresenta uma síntese da metodologia e suas respectivas etapas. Nota-se que alguns parâmetros apresentados nessa figura foram alterados. Estas alterações estão descritas nesse relatório.

Na etapa a, observa-se a entrada de dados topográficos do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson 2008), enquanto, na etapa b, a entrada de dados de rede hidrológica Strahler da Global River Network (GRIN) (Schneider et al. 2017). A etapa c mostra a localização dos rios próximos ao local da UHR, ao passo que a etapa d procura as possíveis represas. Na etapa e, limita-se o número de projetos UHR propostos. Na etapa f são localizados e criados os reservatórios. Na etapa g, são inseridos os dados hidrológicos (Wada, Graaf, and van Beek 2016). Na etapa h é representado um possível projeto de UHR. Na etapa i, os projetos de UHR mais baratos são apresentados. A etapa j mostra a região Sul do Brasil com diversos projetos UHR propostos.

Figura 1: Estrutura do modelo de potencial Brasileiro de UHR.

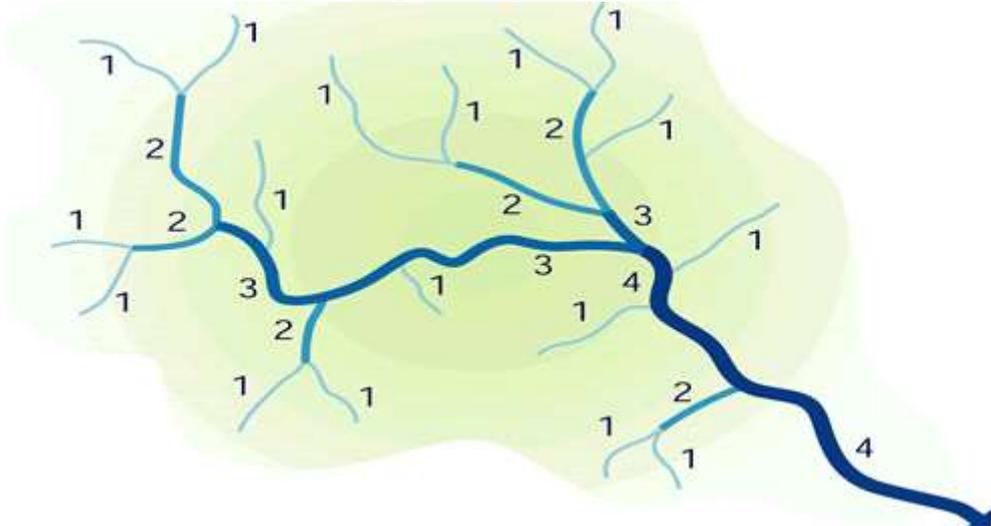


Fonte: (J. Hunt et al. 2020).

Para um melhor entendimento dos dados de rede hidrológica, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta um exemplo de representação da rede Strahler. Como se pode observar, riachos com uma pequena área de captação

têm valor Strahler igual a 1. A combinação de dois rios com Strahler 1 resulta em um rio com Strahler 2. O número de Strahler aumenta com o aumento de conexões de rios com grau Strahler menores. Esta representação é considerada boa, porque facilita a conversão dos dados hidrológicos, em geral de grande resolução, para os dados de Strahler com resolução de 15 segundos.

Figura 2: Exemplo de representação de uma rede Strahler.



Fonte: (Federal Interagency Stream Restoration Working Group 1998).

Alguns dados hidrológicos foram incluídos no modelo com o objetivo de restringir o tamanho dos reservatórios de armazenamento, de acordo com a disponibilidade hídrica. Isso garante que haverá água disponível para encher o reservatório de armazenamento sem um impacto considerável no fluxo do rio.

Um valor de armazenamento conservador foi considerado para reduzir o impacto da planta UHR no fluxo do rio. Neste trabalho, considera-se um volume máximo disponível para captura do rio equivalente a 50% da vazão anual. Este valor foi selecionado com o intuito de reduzir o impacto ambiental de armazenamento no fluxo geral do rio.

2.3 *Dados Utilizados*

Os dados topográficos aplicados são provenientes do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e possuem resolução de 3". A resolução foi reduzida para 15", assumindo o ponto central, a fim de reduzir o tempo de modelagem e combinar com os dados da rede fluvial. Os dados da rede fluvial assumiram a metodologia de rede fluvial Strahler (GRIN) (Schneider et al. 2017), que é derivada dos dados SRTM com resolução de 15". Os dados topográficos e fluviais de Strahler são combinados com os dados hidrológicos retirados do modelo hidrológico global PCR-GLOBWB (Wada, Graaf, and van

Beek 2016), que são derivados em vazões anuais. Usamos método estabelecidos para otimizar o número e o diâmetro dos túneis (Rognlien 2012a) e para a estimativa dos custos das UHR (Slapgard 2012). Esses dados são explicados com mais detalhes nas Assumindo que existe regulação para armazenamento sazonal, se o CMO variar de 300 R\$/MWh no período seco para 150 R\$/MWh no período úmido, o C-EWOC é de 50 R\$/MWh, e levando em consideração que a operação da UHR não impacta no custo do CMO, o retorno financeiro do investimento em armazenamento sazonal seria de 100 R\$/MWh, onde 50 R\$/MWh seria para pagar os custos de operação da UHR. Note que esse retorno financeiro não inclui o armazenamento de ciclos diários e semanais.

Tabela 4 e 1.

Tabela 1: Descrição dos dados e métodos aplicados no modelo.

Descrição	Resolução disponível	Resolução utilizada	Comentários	Links	Referência
Dados Topográficos (SRTM)	3 seg 90x90 m*	15 seg 450x450 m*	A redução na resolução assume o ponto central de 15 segundos dos dados de 3 segundos.	Erro! Fonte de referência não encontrada. a	(Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson 2008)
Rede hidrológica, Dados Strahler (GRIN)	15 seg 450x450 m*	15 seg 450x450 m*	Esses dados são derivados dos mesmos dados topográficos acima, e têm a principal função de conectar o reservatório com o rio e para estimar o comprimento do túnel da UHR.	Erro! Fonte de referência não encontrada. b	(Schneider, A., Jost, A., Coulon, C., Silvestre, M., Théry, A. Ducharme 2017)
Dados hidrológicos (PCR-GLOBWB)	6 mins 10.8x10.8 km*	6 mins 10.8 x 10.8 km*	Esses dados combinam a disponibilidade e o uso de água estimados, durante o período 1960-2010, e incluem a atividade humana (i.e. operação de barragens, extração de água dos rios, etc.). Mais detalhes sobre os dados podem ser vistos na referência (Wada, Graaf, and van Beek 2016). A vazão anual utilizada no modelo é derivada desses dados. Como os dados GRIN e PCR-GLOBWB possuem resolução diferente, foi criada uma metodologia para aumentar a resolução dos dados do PCR-GLOBWB. Esta metodologia consiste em dar uma vazão hidrológica única para cada córrego de acordo com o Strahler do rio em cada seção de 5 graus de latitude e longitude. Isso é realizado encontrando a ordem mais alta de Strahler de cada dado do PCR-GLOBWB com resolução de 6 min, e tirando uma média dos fluxos hidrológicos para cada número de Strahler na seção de 5 graus. Uma desvantagem dessa metodologia é que o fluxo do rio para cada Strahler em uma seção de 5 graus será constante. No entanto, erros envolvendo a diferença topográfica entre os dados de topografia e hidrologia são minimizados. Para melhorar os resultados usando esta metodologia, ela poderia ter sido aplicada a seções menores	Erro! Fonte de referência não encontrada. g	(Wada, Graaf, and van Beek 2016)

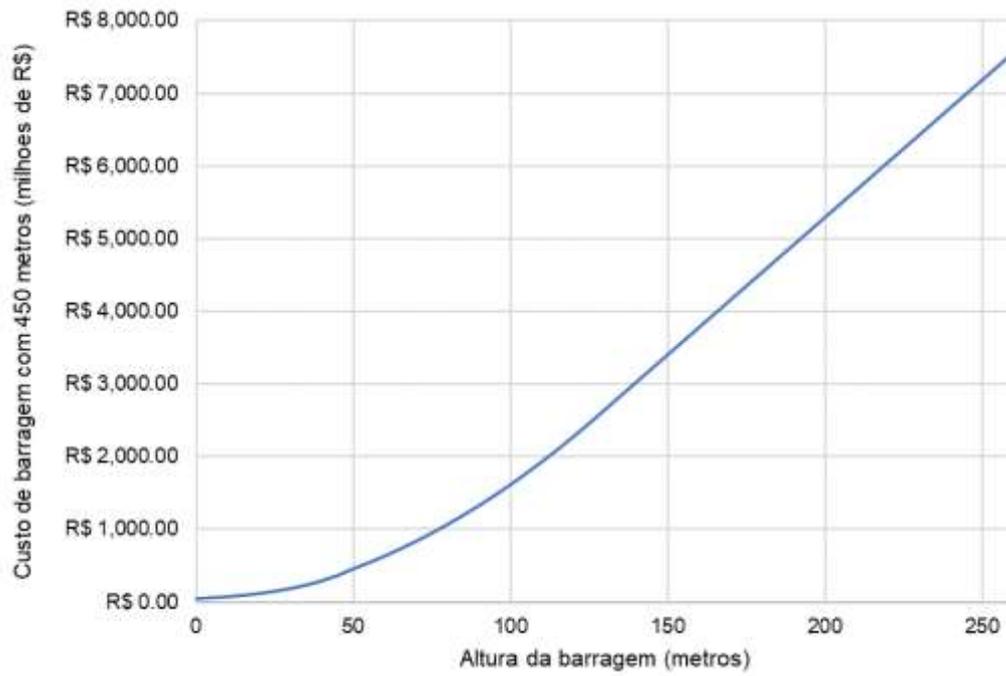
Descrição	Comentários	Links	Referência
Custos das UHR	<p>Os custos das barragens de projetos de UHR no modelo assumem uma barragem de enrocamento com vedação central e são calculados utilizando uma estimativa de custo desenvolvida pelo grupo de pesquisa e apresentada na Erro! Fonte de referência não encontrada. Os dados de custo para os túneis, escavações, equipamentos elétricos e custos de turbinas utilizando (Slaggard 2012). O modelo assume apenas um tipo de projeto de construção para cada um dos componentes da UHR, porque não está no escopo do projeto criar um modelo que compare diferentes designs para cada componente. Essa estimativa de custo resulta em uma boa estimativa preliminar dos custos do projeto. A construção dos túneis pressupõe o uso da tecnologia perfuração e detonação (Drill and Blast em inglês), conforme descrito na Erro! Fonte de referência não encontrada. Os custos também incluem tubulação pressurizada (Erro! Fonte de referência não encontrada.) e tubos de aço embutidos (Erro! Fonte de referência não encontrada.). A escavação varia com a queda de geração e a capacidade instalada, conforme descrito na Erro! Fonte de referência não encontrada. A turbina assumida é Francis, conforme descrito nas Erro! Fonte de referência não encontrada. e Erro! Fonte de referência não encontrada. A seleção da turbina também depende do gerador, conforme descrito na Erro! Fonte de referência não encontrada. Para a otimização do sistema turbina/gerador, os custos de diferentes velocidades de rotação, conforme descrito na Erro! Fonte de referência não encontrada., são comparados com a carga média de geração e vazões sob análise e a opção mais barata é selecionada.</p>	Estimate Project Cost Stage	<p>“Cost Base for Hydropower Plants (With a Generating Capacity of More than 10,000 KW). Published by: Norwegian Water Resources and Energy Directorate. Editor: Jan Slaggård. Authors: SWECO Norge AS,” n.d.)</p>
Design dos túneis	<p>A metodologia utilizada para otimizar a construção dos túneis foi retirada de (Rognlien 2012b). Essa metodologia consiste em comparar os custos de investimento da construção dos túneis, como diâmetro e número de túneis e os custos de operação das usinas. O custo de operação das usinas depende muito das perdas de energia devido ao atrito nos túneis. Quanto maior o diâmetro e o número de túneis, mais eficiente é a planta.</p>	Estimate Project Cost Stage	(Rognlien 2012a)

* Distância no equador, que é corrigida com mudanças na latitude.

Fonte: Elaboração própria.

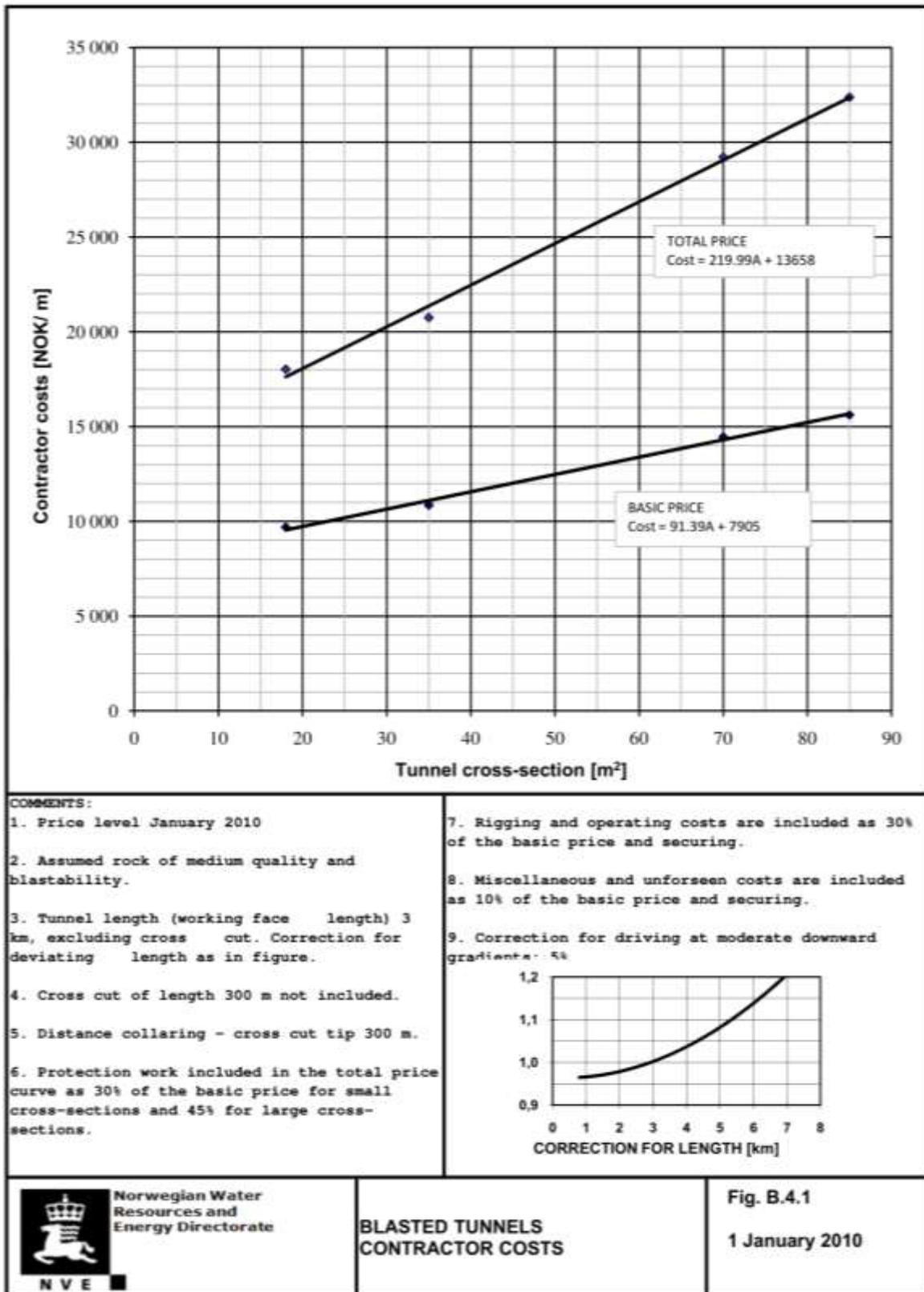
As imagens a seguir apresentam as estimativas de custo utilizadas nos projetos de UHR propostos no modelo.

Figura 3: Estimativa do custo de barragens das UHR.



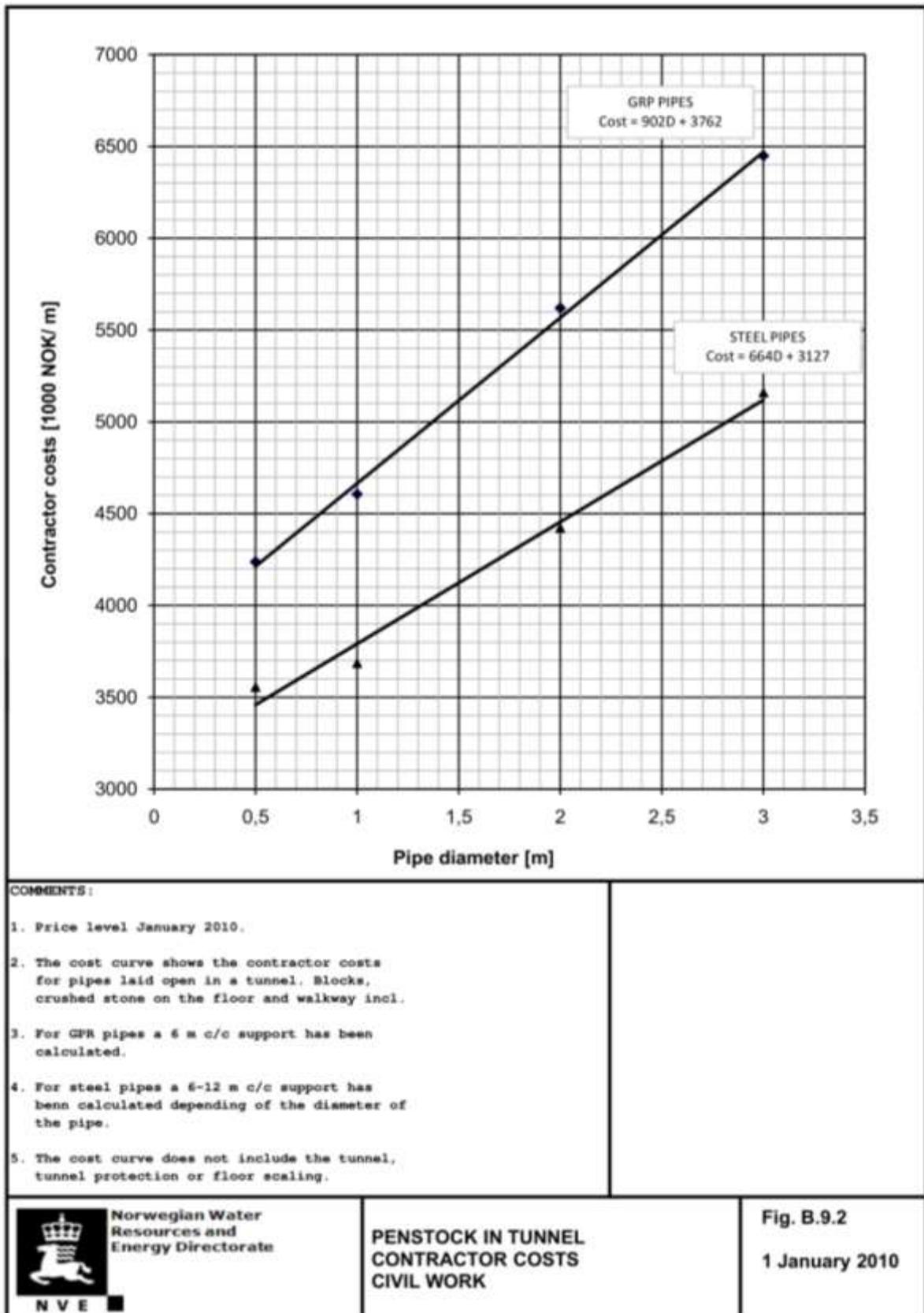
Fonte: Elaboração própria, baseado em dados do (TCU 2010).

Figura 4: Estimativa de custo da escavação dos túneis com a tecnologia “drill and blast”.



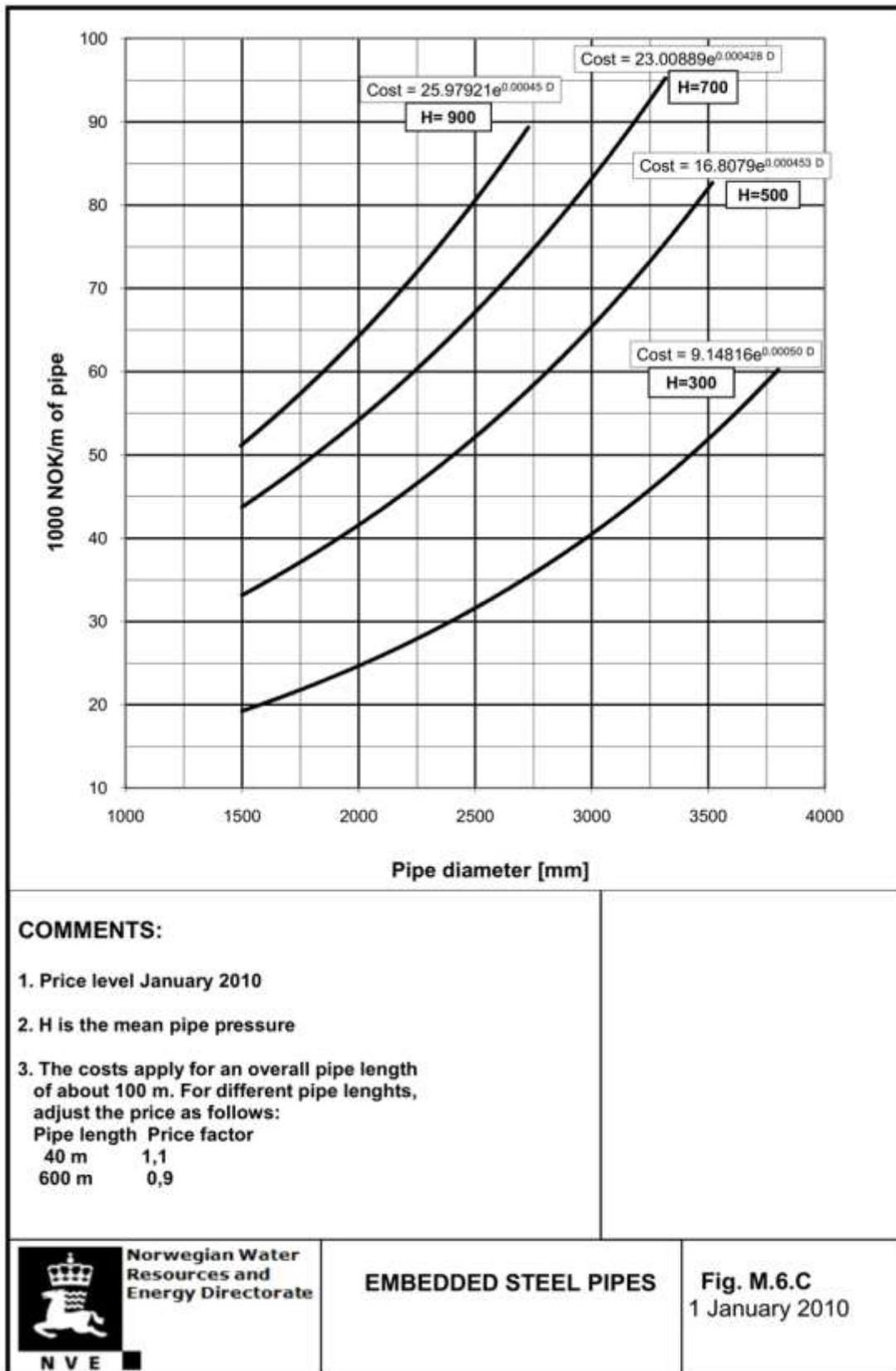
Fonte: (Slapgard 2012).

Figura 5: Estimativa de custo da tubulação pressurizada e da construção civil.



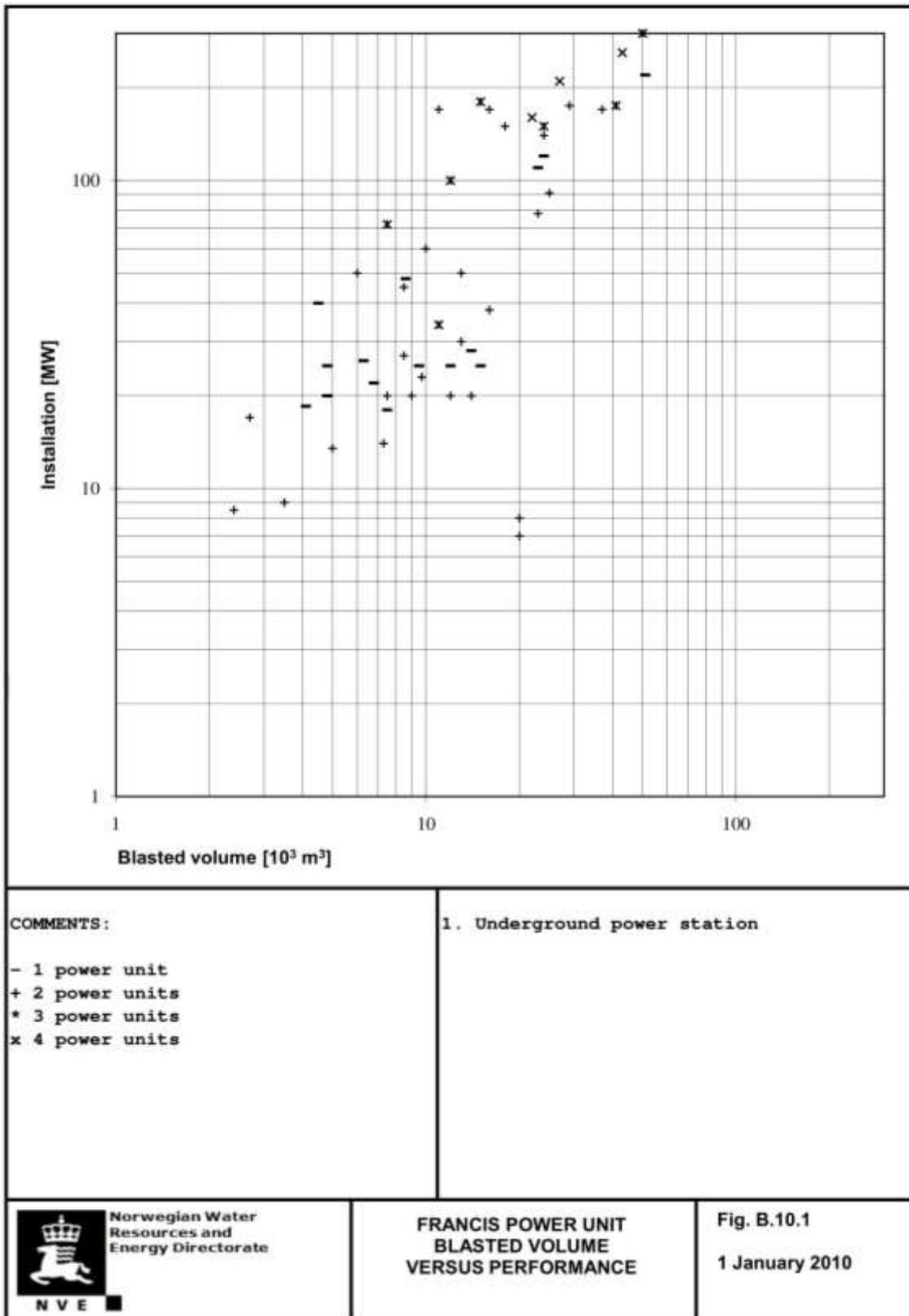
Fonte: (Slapgard 2012).

Figura 6: Estimativa de custo da tubulação embutida de metal.



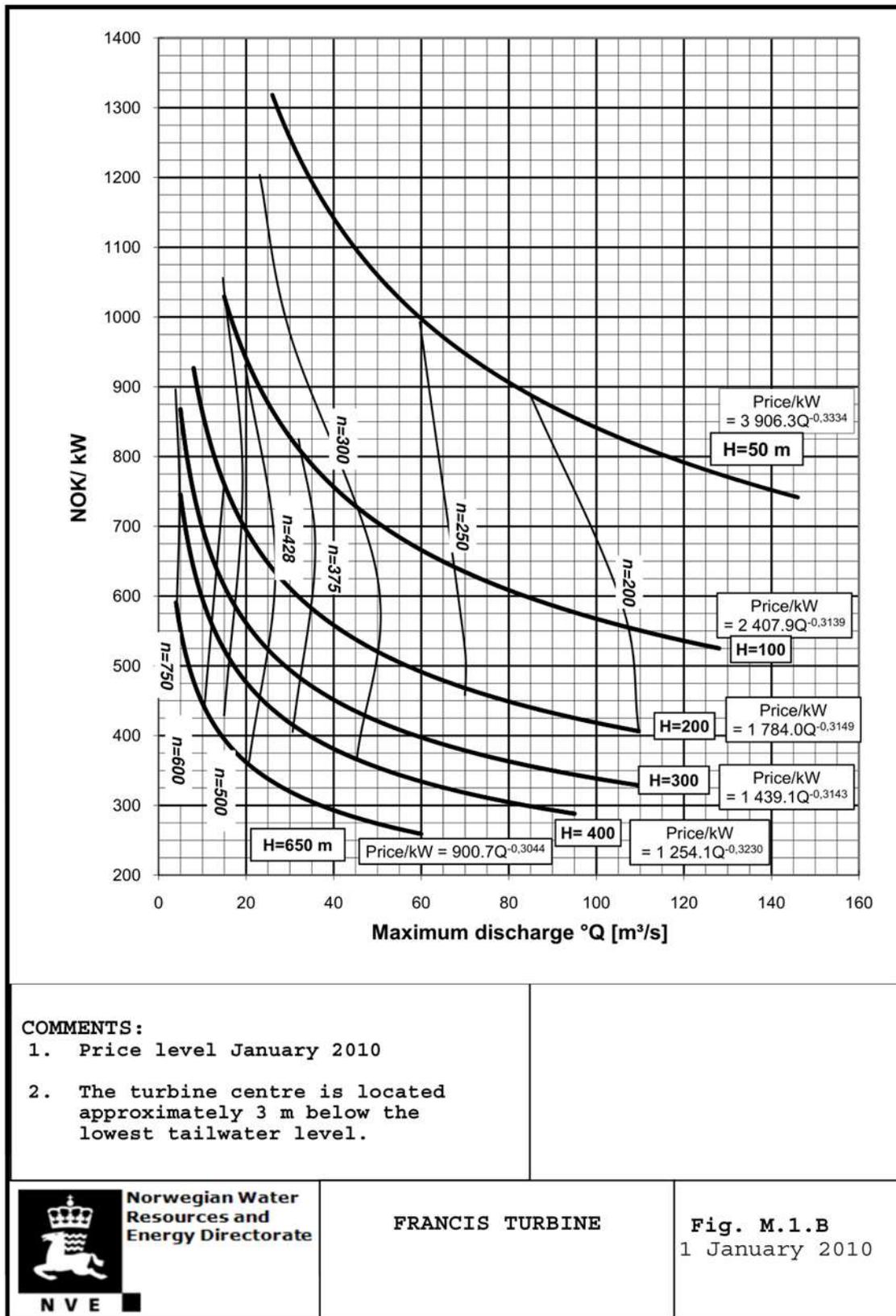
Fonte: (Slaggard 2012).

Figura 7: Estimativa de custo da escavação da casa de força da UHR.



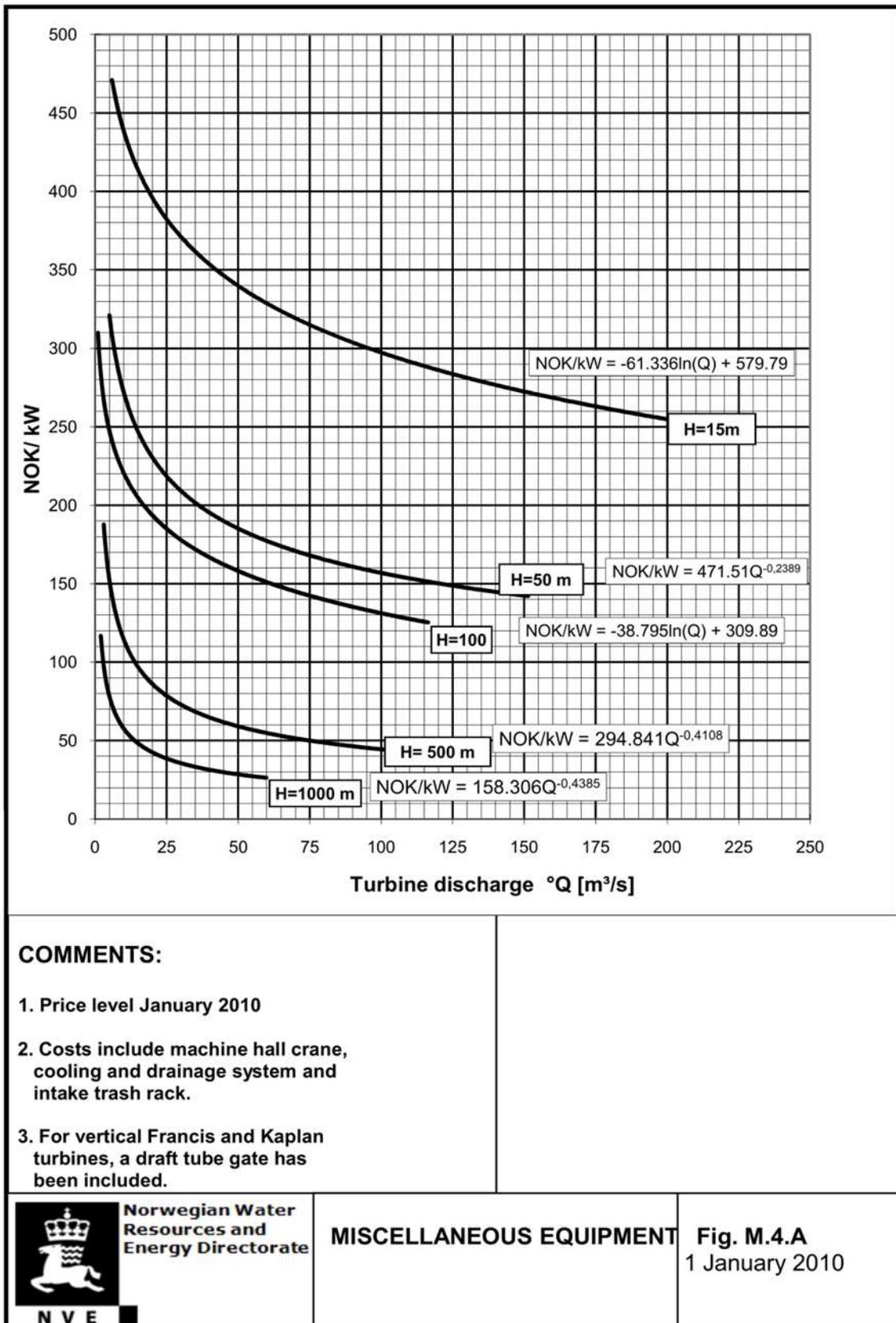
Fonte: (Slapgard 2012).

Figura 8: Estimativa de custo para turbinas Francis.



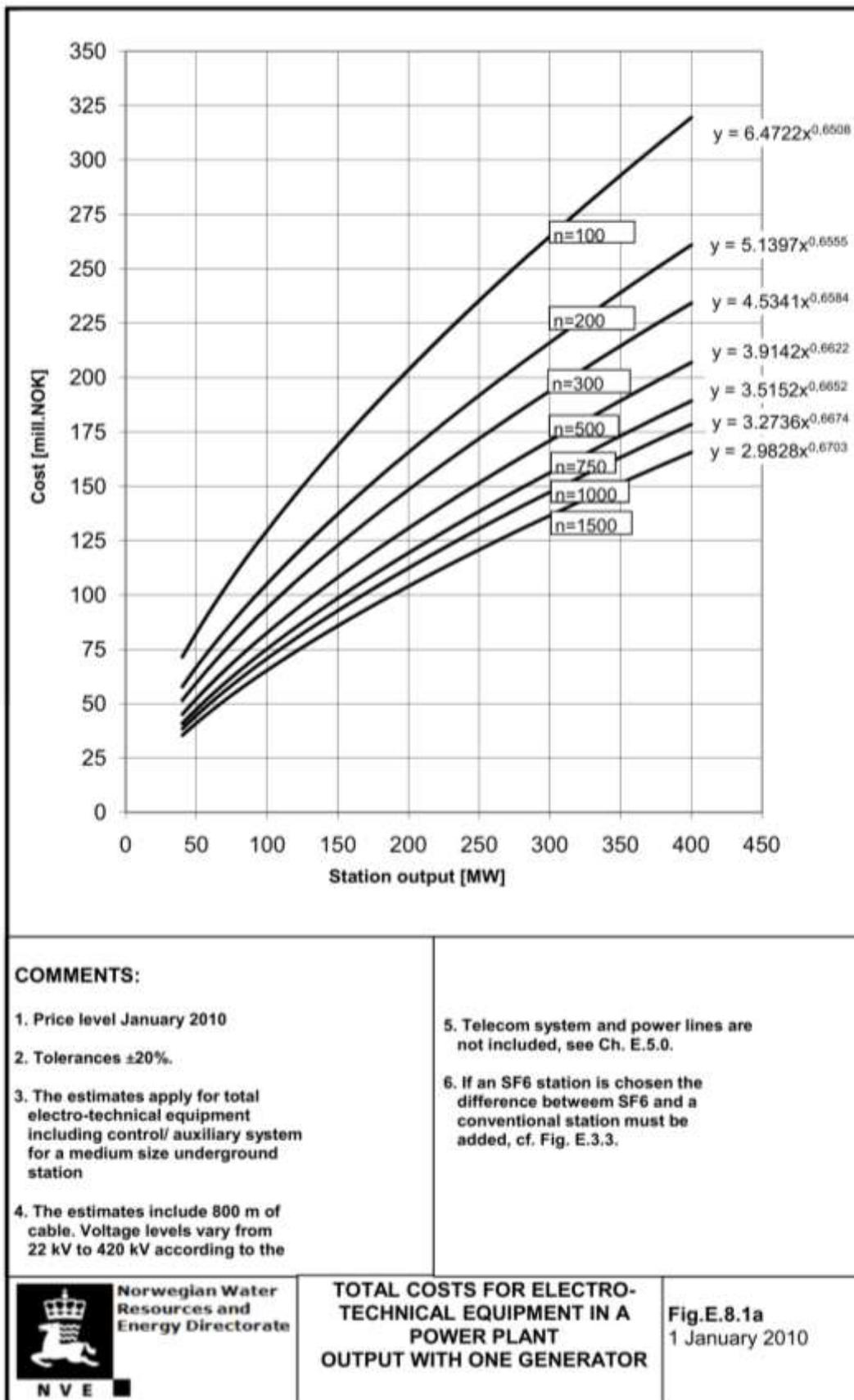
Fonte: (Slapgard 2012).

Figura 9: Estimativa de custo de equipamentos auxiliares.



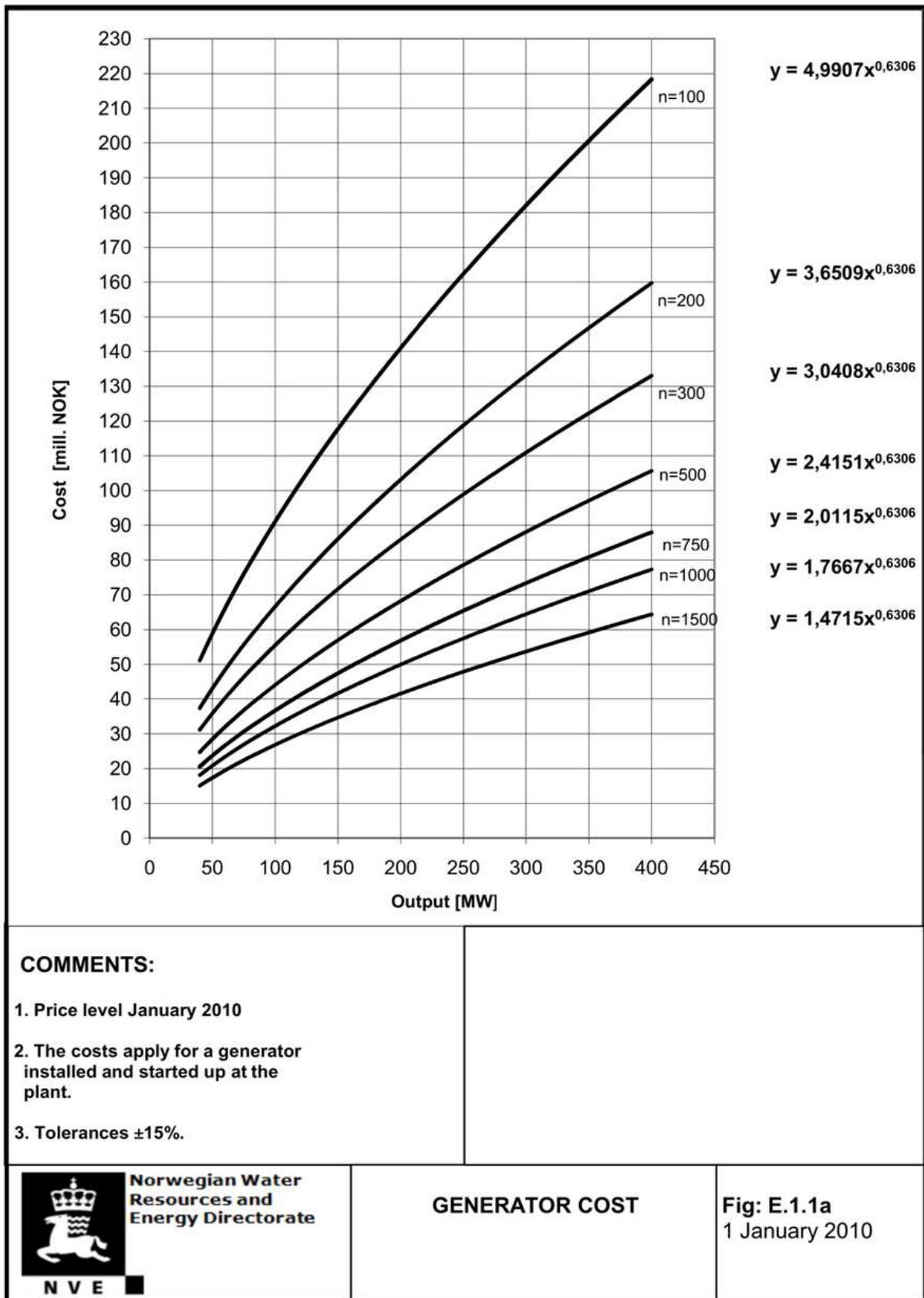
Fonte: (Slapgard 2012).

Figura 10: Estimativa de custo de equipamentos elétricos (sem incluir o gerador).



Fonte: (Slapgard 2012).

Figura 11: Estimativa de custo do gerador.



Fonte: (Slapgard 2012).

2.4 *Modelo de seleção de local e projeto de engenharia*

O modelo de seleção do local foi dividido em nove etapas principais (

Tabela 2). Inicialmente, os dados topográficos são combinados com os dados Strahler do rio, que é uma medida numérica da complexidade de ramificação dos rios, derivada dos mesmos dados topográficos. Quanto mais alto o valor de ordem Strahler do rio, mais rios tributários (braços) contribuem com água para determinada parte do rio em questão (Schneider et al. 2017).

Os dados de topografia e da rede de rios Strahler são interpostos em cima do outro com a mesma resolução. Isso possibilita que o reservatório desenvolvido seja conectado ao rio mais próximo com uma vazão razoável. Após conectar o reservatório ao rio, pode-se estimar o comprimento dos túneis que conectam o reservatório superior e o reservatório inferior no rio. Os dados do rio Strahler também são usados para reduzir a quantidade de projetos UHR desenvolvidos dentro de uma determinada área e, conseqüentemente, reduzir o tempo de modelagem. Projetos de UHR com ciclos diários e semanais não necessitam de grandes volumes de água para operar. Desta forma, os rios conectados a UHR com ciclos diários e semanais podem ter baixa ou alta vazão e Strahler. Já projetos de UHR com ciclos sazonais e plurianuais necessitam de muita água para operar. Desta forma, os rios conectados a projetos de UHR sazonal e plurianual necessitam de rios com alta vazão e Strahler.

Para cada ponto em análise (PUA), o modelo busca rios com Strahler igual ou maior que 2 dentro de 1 a 20 km de distância (comprimento do túnel). Com o objetivo de reduzir a quantidade de projetos desenvolvidos pelo modelo, antes de desenvolver os projetos de UHR, o modelo remove os projetos com divisão entre a queda mínima da UHR (Q , em metros) e o comprimento da tubulação (T , em km) menores que 10, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Essa filtragem, reduz substancialmente o tempo de conversão do modelo.

Se for encontrado um grande rio com $Q/T < 10$, o modelo tenta construir barragens de 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 ou 300 metros de altura, ao longo de 4 eixos (NS, WE, NW-SE, NE-SW) e com comprimento máximo de 15 km (

Tabela 2 (L4)). Caso a topografia permita a construção dessas barragens, verifica-se se o PUA é o ponto mais baixo da barragem (caso não seja, o processo é interrompido com o intuito de não repetir o mesmo projeto).

Usando a topografia do entorno da barragem e os limites da área máxima de alagamento por Strahler do reservatório (Tabela 3), o modelo identifica o lado da barragem com o maior volume de armazenamento. Posteriormente, o modelo assume que o reservatório sendo analisado tem o nível de água elevado, como mostra a Figura 1 h. O nível de água do reservatório é variado para determinar as curvas de área inundada vs. nível e volume de armazenamento vs. nível. Isso é feito subtraindo o volume de terra e água com o reservatório, em um determinado nível, do volume de terra e água sem o reservatório.

A maior parte do custos do projeto são estimados usando as equações apresentadas na referência (Slapgard 2012). Desta forma, o custo é dividido em barragem, túnel, escavação da casa de força, turbina-bomba, equipamento eletrotécnico e custo do terreno. Mais detalhes sobre as premissas para a estimativa de custo são apresentados na 1.

Na análise, a capacidade de armazenamento hídrico dos projetos de UHR é limitada em função da disponibilidade de água do rio principal. A capacidade máxima de água disponível para armazenamento é limitada a 50% do fluxo anual do rio. Se a capacidade de armazenamento for muito maior do que a quantidade de água disponível, o custo estimado de armazenamento aumenta, pois uma das seções do reservatório nunca será enchida. Os custos do projeto são então comparados com a hidrologia do rio para encontrar os custos de armazenamento hídrico e energético.

Tabela 2: Descrição dos estágios do modelo de mapeamento de UHR no Brasil.

Estágios do modelo	Descrição	Links no relatório
Selecionar o Ponto Sob Análise (PUA)	Esta seção consiste em combinar dados topográficos e do rio Strahler e percorrer pixel de resolução 450mx450m em busca de projetos de UHR considerando as limitações apresentadas neste relatório.	Erro! Fonte de referência não encontrada.a
Triagem do rio	Esta etapa procura um rio com Strahler 2. Se encontra rios a uma distância de 1 a 20 km do Ponto Sob Análise (PUA) e o modelo continua. Se houver rios com diferentes rios com Strahler na ordem de 2 a 12 a menos de 20 km do reservatório superior, o modelo criará um projeto de UHR diferente para cada rio. Um aspecto importante da triagem do rio é que o modelo não pode construir a barragem no mesmo rio onde a água é captada. O modelo remove essa possibilidade assumindo que o Strahler da barragem tem que ser pelo menos 2 níveis menor que o Strahler do rio de onde a água é extraída.	Erro! Fonte de referência não encontrada.b
Triagem de barragens	Este estágio cria quatro barragens diferentes nas orientações dadas: W para L, N para S, NE para SW, NW para SE. A altura da barragem varia de 30 a 300 m, em intervalos de 30 m. Cada PUA pode ter projetos com 10 diferentes alturas de barragem.	Erro! Fonte de referência não encontrada.d
Ponto Mais Baixo da Barragem	Com o objetivo de reduzir o número de interações, esta etapa verifica se o pixel em análise é o ponto mais baixo das barragens propostas. Se for o ponto mais baixo das barragens propostas, o modelo segue desenvolvendo o projeto UHR. O PUA, local da barragem, geralmente coincide com um rio tributário ao rio onde a água é extraída.	Erro! Fonte de referência não encontrada.e
Lado do reservatório e inundação	Esta etapa verifica qual lado da barragem deve ser inundado para construir o reservatório. Se o reservatório inundar uma área maior que a apresentada na Tabela 3, o modelo inundará o outro lado da barragem. Se ambas as áreas inundadas forem maiores do que a área na Tabela 3, o projeto é descartado.	Erro! Fonte de referência não encontrada.f
Capacidade de armazenamento do reservatório	Uma vez que o reservatório de armazenamento é inundado, o nível do reservatório varia para encontrar a área inundada vs. nível e volume de armazenamento vs. curvas de nível. Isso é feito subtraindo o volume de terra e água com o reservatório em um determinado nível pelo volume de terra e água sem o reservatório.	-
Reservatório, Comparação de Hidrologia	A hidrologia é incluída na análise para limitar a capacidade de armazenamento hídrico e energético dos projetos de UHR de acordo com a disponibilidade de água no rio principal. A capacidade máxima de armazenamento hídrico é limitada a 50% da vazão do rio. Se a capacidade de armazenamento for muito superior à quantidade de água disponível, o custo estimado do armazenamento tende a infinito, pois o reservatório nunca encherá. Ou seja, esta seção não retira o projeto que não tem água suficiente para encher o reservatório. Ele calcula o custo de energia e armazenamento hídrico com um grande reservatório,	-

	mesmo que a água disponível não seja suficiente para encher o reservatório em seis meses. Por exemplo, se o reservatório for duas vezes maior do que a água disponível, o custo de armazenamento energético será maior do que se houvesse água suficiente para encher o reservatório. Assim, o reservatório fica muito caro e não é selecionado. O mesmo reservatório com uma barragem menor é selecionado, pois o custo da barragem e a área inundada são menores. Em outras palavras, o projeto não é cancelado, simplesmente não é selecionado.	
Estimar o custo do projeto	Esta seção calcula os custos do projeto, que são divididos em barragem, túnel, escavação da casa de força, turbina-bomba, equipamento eletrotécnico e custos do terreno.	1
Estimar o custo de armazenamento	Os custos do projeto são comparados com a hidrologia do rio para encontrar os custos de armazenamento hídrico e energético.	Equação 1 Equação 2

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3: Variação de parâmetros utilizados para o desenvolvimento dos projetos de UHR.

Título	Variação dos parâmetros
Altitude da Barragem (m)	30 até 300 com aumentos de 30 metros.
Comprimento da tubulação (km)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20.
Strahler do rio	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12.
Área alagada por Strahler (km ²)	12 Strahler = 1620 km ² ; 11 Strahler = 1620 km ² ; 10 Strahler = 1418 km ² ; 9 Strahler = 1215 km ² ; 8 Strahler = 1013 km ² ; 7 Strahler = 810 km ² ; 6 Strahler = 608 km ² ; 5 Strahler = 405 km ² ; 4 Strahler = 203 km ² ; 3 Strahler = 101 km ² ; 2 Strahler = 20 km ² .

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 12, os projetos onde a divisão é menor que 10 (em laranja) não são desenvolvidos e os projetos maiores que 10 (em azul) são desenvolvidos.

Figura 12: Cálculo da razão entre a queda mínima da UHR (m) e o comprimento da tubulação (km) (Q/T).

		Queda mínima da UHR (m)										
		20	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Comprimento da tubulação da UHR (km)	20	1	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	45
	19	1.052632	2.631579	5.263158	10.52632	15.78947	21.05263	26.31579	31.57895	36.84211	42.10526	47.36842
	18	1.111111	2.777778	5.555556	11.11111	16.66667	22.22222	27.77778	33.33333	38.88889	44.44444	50
	17	1.176471	2.941176	5.882353	11.76471	17.64706	23.52941	29.41176	35.29412	41.17647	47.05882	52.94118
	16	1.25	3.125	6.25	12.5	18.75	25	31.25	37.5	43.75	50	56.25
	15	1.333333	3.333333	6.666667	13.33333	20	26.66667	33.33333	40	46.66667	53.33333	60
	14	1.428571	3.571429	7.142857	14.28571	21.42857	28.57143	35.71429	42.85714	50	57.14286	64.28571
	13	1.538462	3.846154	7.692308	15.38462	23.07692	30.76923	38.46154	46.15385	53.84615	61.53846	69.23077
	12	1.666667	4.166667	8.333333	16.66667	25	33.33333	41.66667	50	58.33333	66.66667	75
	11	1.818182	4.545455	9.090909	18.18182	27.27273	36.36364	45.45455	54.54545	63.63636	72.72727	81.81818
	10	2	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	9	2.222222	5.555556	11.11111	22.22222	33.33333	44.44444	55.55556	66.66667	77.77778	88.88889	100
	8	2.5	6.25	12.5	25	37.5	50	62.5	75	87.5	100	112.5
	7	2.857143	7.142857	14.28571	28.57143	42.85714	57.14286	71.42857	85.71429	100	114.2857	128.5714
	6	3.333333	8.333333	16.66667	33.33333	50	66.66667	83.33333	100	116.6667	133.3333	150
	5	4	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180
	4	5	12.5	25	50	75	100	125	150	175	200	225
	3	6.666667	16.66667	33.33333	66.66667	100	133.3333	166.6667	200	233.3333	266.6667	300
	2	10	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450
	1	20	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Fonte: Elaboração própria.

2.5 Dimensionamento e custo de armazenamento

A variação dos custos de armazenamento hídrico e energético, a longo prazo, com a água disponível para armazenamento, é apresentada na Equação 1. Já os custos para armazenamento adicional de energia de curto prazo são apresentados na Equação 2. Para obter mais detalhes sobre as Equações 1 a 2, consulte a Assumindo que existe regulação para armazenamento sazonal, se o CMO variar de 300 R\$/MWh no período seco para 150 R\$/MWh no período úmido, o C-EWOC é de 50 R\$/MWh, e levando em consideração que a operação da UHR não impacta no custo do CMO, o retorno financeiro do investimento em armazenamento sazonal seria de 100 R\$/MWh, onde 50 R\$/MWh seria para pagar os custos de operação da UHR. Note que esse retorno financeiro não inclui o armazenamento de ciclos diários e semanais.

Tabela 4.

$$C_W = \frac{C_P}{W_S}; C_{Ewc} = \frac{C_P}{E_{Rwc} \frac{W_R}{W_S}}; C_{EWoc} = \frac{C_P}{E_{RWoc} \frac{W_R}{W_S}} \begin{cases} \text{if } W_R < Q_A & \rightarrow W_S = W_R \\ \text{if } Q_A < W_R < 2Q_A & \rightarrow W_S = Q_A + 0.5W_R \\ \text{if } W_R > 2Q_A & \rightarrow W_S = 1.5Q_A \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

- C_W é o custo de armazenamento hídrico R\$/m³
- C_P é o custo do projeto (ou seja, barragem, túnel, turbina, equipamento elétrico, escavação e terreno) em R\$
- W_S é a capacidade de armazenamento hídrico ajustada pela disponibilidade de água em m³
- C_{EWoc} é o custo de armazenamento energético excluindo a cascata, em R\$/MWh
- C_{Ewc} é o custo de armazenamento energético incluindo a cascata em R\$/MWh
- W_R é a capacidade de armazenamento hídrico do reservatório desenvolvido no modelo em km³
- E_{Rwc} e E_{RWoc} são a capacidade de armazenamento energético do reservatório desenvolvido pelo modelo com e sem cascata em MWh, respectivamente.

$$C_{GW} = \frac{C_{PGW}}{G} \quad (2)$$

Onde:

- C_{GW} é o custo da capacidade de geração adicional em R\$/KW
- C_{PGW} é o custo da capacidade de geração adicional, ou seja, túnel, turbina, equipamento elétrico, escavação, em bilhões de R\$
- G é a capacidade de geração em GW (fixo em 1 GW para todas as plantas UHR propostas).

O modelo também calcula variantes para o mesmo aproveitamento com capacidade instalada necessária para encher o reservatório superior em seis meses, 1 mês e 1 dia.

Assumindo que existe regulação para armazenamento sazonal, se o CMO variar de 300 R\$/MWh no período seco para 150 R\$/MWh no período úmido, o C-EWOC é de 50 R\$/MWh, e levando em consideração que a operação da UHR não impacta no custo do CMO, o retorno financeiro do investimento em armazenamento sazonal seria de 100 R\$/MWh, onde 50 R\$/MWh seria para

pagar os custos de operação da UHR. Note que esse retorno financeiro não inclui o armazenamento de ciclos diários e semanais.

Tabela 4: Premissas, incertezas, limitações e possível aprimoramento do modelo.

Título	Definição
Premissas	
Usinas em cascata	O modelo assume que o potencial de armazenamento energético não se limita apenas aos reservatórios superior e inferior do projeto UHR. Também inclui a energia gerada nas barragens em cascata a jusante da planta UHR. Supõe-se que 60% da queda de energia hidrelétrica a jusante da planta de UHR seja desenvolvida.
Custo da terra	O modelo assume que o custo da terra necessário para o reservatório é igual a 41.000 R\$/ha. Uma das desvantagens mais relevantes para a construção de projetos de UHR é a necessidade de criar um reservatório. A definição de um alto custo do solo obriga o modelo a buscar projetos com pequenas áreas alagadas e, com isso, menores impactos sociais e ambientais. Um custo fixo e alto do terreno pressupõe que os custos das medidas socioambientais adequadas na construção do reservatório de UHR estão incluídos no custo do projeto.
Correções de latitude	O modelo corrige a variação da resolução dos dados em grade de acordo com a latitude. Essa correção é feita em passos de 5° de latitude, de acordo com a segmentação dos dados topográficos.
Extração de água do rio	O modelo apresentado nesse relatório assume que a UHR pode extrair 50% da vazão anual do rio para encher o reservatório. Esse dado só é relevante nos casos onde a UHR tem grande reservatórios, ou seja, UHR sazonais. Para projetos de UHR diário e semanal, a extração de água do rio tende a ser reduzida.
Premissas econômicas	A taxa de juros assumida para o investimento para a construção do projeto é de 4,5%, a planta está estimada para operar por 40 anos, o fator de desconto é de 18,2, premissas de custo como capital, O&M, compras, incertezas, gestão da construção, pré-engenharia, custos de equipamentos e outros custos variam para cada componente do projeto e são apresentados em (Slapgard 2012). A taxa de conversão da coroa norueguesa para R\$ assumiu a média da taxa de conversão do ano 2020 até de janeiro até setembro e é considerada como 0,59. A taxa de inflação da coroa norueguesa usada para trazer o custo de 2010 a 2020 é presumida em 1,5% ao ano. Isso resulta em uma taxa de conversão de 0.685 reais em 2020/coroas norueguesa em 2010.

<p>Comparação entre capacidade de armazenamento e custo</p>	<p>A comparação entre a capacidade de armazenamento e seu custo é dividida nas três seções abaixo: (i) se a capacidade de armazenamento for menor que a água disponível para ser armazenada, os custos de armazenamento hídrico e energético consistem no custos de construção do projeto em R\$ dividido pela quantidade de água ou energia que o projeto armazenou ao longo da operação da usina em km³ e MWh, respectivamente. Os custos e serviços que acontecem ao longo da operação da planta são trazidos aos valores de hoje com um fator de desconto de 18,2. (ii) se a capacidade de armazenamento do reservatório for menor que a quantidade anual de água disponível para armazenar vezes dois. Qualquer capacidade de armazenamento adicional que exceda o QA reduzirá apenas os custos de armazenamento hídrico e energético pela metade em comparação com o QA (Equação 1). Isso porque a seção do reservatório destinada ao armazenamento energético sazonalmente tem maior chance de encher do que a seção destinada ao armazenamento energético interanual. (iii) se a capacidade de armazenamento for maior que o dobro da disponibilidade anual de água disponível, WS é fixo e igual a 1,5 QA. Isso significa que qualquer aumento na capacidade de armazenamento que ultrapasse o dobro do valor da disponibilidade anual de água não contribuirá para reduzir o custo do armazenamento hídrico e energético.</p>
<p>Limites de custos de armazenamento hídrico e energético</p>	<p>Os limites de custos de armazenamento hídrico e energético foram definidos com o intuito de reduzir o número total de projetos para cerca de 2.500 projetos de UHR sazonal e 2.500 projetos de UHR diário e semanal, para uma apresentação mais limpa dos resultados e focar em projetos possivelmente viáveis.</p>
<p>Incertezas</p>	
<p>Topografia segmentada</p>	<p>A topografia utilizada no estudo foi dividida em seções de 5 graus. Barragens, reservatórios e túneis que atingem as bordas do arquivo de topografia são descartados.</p>
<p>Dados hidrológicos</p>	<p>Pode haver incertezas originadas dos dados hidrológicos. Como os dados GRIN e PCR-GLOBWB possuem resolução diferente, foi criada uma metodologia para aumentar a resolução dos dados PCR-GLOBWB. Esta metodologia consiste em dar uma vazão hidrológica única para cada córrego do rio Strahler de ordem superior a 1 em cada seção de 5 graus. Isso é realizado encontrando a ordem mais alta do rio Strahler de cada PCR-GLOBWB de resolução de 6 min, então tomando uma média dos fluxos hidrológicos para cada número de ordem do rio Strahler. Uma desvantagem dessa metodologia é que o fluxo do rio para cada ordem de fluxo de Strahler em uma seção de 5 graus será constante. No entanto, erros envolvendo a diferença topográfica entre os dados são minimizados. Para melhorar os resultados usando esta metodologia, ela poderia ter sido aplicada a seções menores, de 1 grau ou menos. Foram considerados apenas rios com fluxo de Strahler acima de 1, por apresentarem vazão suficiente para justificar a construção de uma usina UHR. Não há muitos reservatórios que</p>

	possam ser preenchidos totalmente com a água disponível para extração.
Estimativa de custo	As estimativas de custo neste relatório pretendem fornecer uma estimativa aproximada para os custos do projeto dos principais componentes, como barragem, túnel, comportas, geradores, turbina, escavações de casa de força e necessidade de terreno. Alguns aspectos de custo não estão incluídos nessas estimativas, por exemplo, custos de construção (que afetam principalmente os custos de barragens), túneis de acesso, instalações de transporte, subestações, linhas de transmissão, poços, câmaras de sobretensão, portões, válvulas, custos socioambientais e culturais, custos de vida, etc. Alguns desses custos variam consideravelmente com o país e as características locais. O custo da escavação do túnel assume um valor médio e não inclui o tipo de rocha ou terra a ser escavada. O número e diâmetro dos túneis são otimizados com a minimização dos custos de capital e operação, assumindo um fator de capacidade de 70% para a utilização do túnel e um preço de eletricidade de 65 R\$/MWh.
Formação geológica	Este trabalho não inclui a composição geológica e estrutura da topografia. Uma formação geológica adequada é fundamental para a construção de reservatórios de UHR. Isso porque o reservatório de UHR sofre grande pressão devido à alta coluna d'água que poderia chegar a 300 metros no modelo. Outra questão é que esse estresse varia ao longo do ano com a flutuação do nível do reservatório, o que pode resultar em fadigas na formação geológica. Assim, os locais considerados para a construção dos reservatórios de UHR não devem apresentar fraturas geológicas e devem ter uma composição que suporte essas pressões e fadigas.

Resolução	<p>A resolução da topografia foi reduzida de 3 seg para 15 seg para aumentar a velocidade computacional do modelo. Com resolução de 15 segundos, o modelo demorou uma semana para finalizar os cálculos. Com uma resolução de 3 segundos, os autores estimam que levaria mais de seis meses para estimar o potencial de UHR no Brasil. Uma resolução de 15 segundos é equivalente a 450 metros no equador, esta baixa resolução impacta principalmente a estimativa das barragens UHR. 450 metros é semelhante ao comprimento de uma barragem de tamanho médio. Esta baixa resolução não leva em consideração o perfil completo das barragens de médio porte e frequentemente reduz a estimativa da altura e do comprimento da barragem necessários para criar o reservatório. Isso subestima os custos das barragens para projetos de UHR, particularmente para barragens com comprimentos menores que 450 metros. Essa subestimação, entretanto, diminui com o aumento do comprimento das barragens. Além do tamanho da barragem, os custos são sensíveis ao comprimento do túnel. Mas, no geral, os comprimentos dos túneis são muito maiores do que a resolução topográfica, então o erro é pequeno em comparação com o custo total do túnel. Mais explicações sobre o impacto da resolução topográfica nos projetos de UHR podem ser vistas (Gimeno-Gutiérrez and Lacal-Aránzaga 2015; Rogeau, Girard, and Kariniotakis 2017). A resolução hidrológica de 6 minutos é aceitável porque as variações de fluxo por pixel dentro de um rio são uma pequena fração do fluxo total do rio.</p>
Limitações	
Design do túnel	<p>O design do túnel no modelo se limita à conexão do rio com o meio da barragem. Embora esse seja geralmente o melhor projeto para os túneis, nem sempre isso é verdade. O túnel poderia se conectar ao rio, saindo de qualquer ponto abaixo do nível mínimo do reservatório.</p>
Barragem única	<p>Os projetos de UHR neste modelo são limitados a uma barragem única. Este design cobre a maior parte do potencial. No entanto, existem locais onde duas ou mais barragens seriam necessárias para construir um reservatório ou aumentar sua capacidade de armazenamento.</p>
Nível mínimo do reservatório	<p>O nível mínimo do reservatório neste modelo assume que todo o volume do reservatório seria usado. Esta prática não é adequada e um nível mínimo de reservatório deve ser deixado no reservatório devido a restrições ambientais.</p>
Projeto UHR único	<p>O modelo cria apenas um projeto UHR em paralelo ao rio principal. Uma cascata de dois ou mais projetos de UHR poderia ser criada para aumentar a energia potencial da água e aumentar o potencial de armazenamento energético e hídrico.</p>

<p><i>Open-Loop</i> UHR</p>	<p>As UHR com ciclo sazonal desenvolvidas pelo modelo são UHR <i>Open Loop</i>, e envolvem a extração de água de um rio. O rio pode ter um reservatório médio ou pequeno para fornecer um nível de regulação do fluxo do rio para garantir que a UHR terá água suficiente para bombear para o reservatório superior. Note que os custos da barragem inferior não são estimados. Alternativamente, se os impactos da construção de um reservatório no rio principal forem altos, o que impacta a viabilidade do projeto, um reservatório inferior para o sistema UHR poderia ser construído perto do rio. Esse reservatório inferior minimizaria o impacto da operação da planta UHR no fluxo do rio.</p>
<p><i>Closed-Loop</i> UHR</p>	<p>As UHR com ciclo diário e semanal desenvolvidas pelo modelo podem ser consideradas UHR de <i>Closed Loop</i>, já que na maioria dos projetos a vazão no reservatório inferior são baixas. Eles geralmente requerem dois reservatórios e represas, e apenas armazenam energia. Eles não têm um impacto substancial nos rios próximos porque não são construídos em um rio com alta vazão e a entrada de água no sistema pretende apenas complementar as perdas de água por evaporação. É complicado justificar a construção de uma UHR <i>Closed Loop</i> com ciclo sazonal porque, embora esse arranjo possibilitasse a construção de projetos distantes dos grandes rios, a necessidade de construção de duas grandes barragens e reservatórios próximos um do outro reduz o número de locais com topografia adequada que tornariam esses projetos viáveis. Além disso, não haveria usinas hidrelétricas em cascata que contribuiriam para o aumento do armazenamento energético sem custos adicionais.</p>
<p>UHR em série</p>	<p>Há também a possibilidade de construção de dois reservatórios UHR em série, sendo um dos reservatórios conectado ao rio principal (reservatório intermediário) e o outro reservatório conectado ao reservatório intermediário de UHR (reservatório superior). Este arranjo é interessante porque aumenta a carga total de geração da planta. Outra limitação que esse arranjo resolve é o fato de que os projetos de UHR geralmente são limitados a uma queda de geração de 1.200 metros. Ter dois UHR em série poderia aumentar a queda de geração geral da planta para 2.400 metros. Um exemplo de tal arranjo pode ser visto na usina Limberg II UHR na Áustria.</p>
<p>Potencial hidrelétrico</p>	<p>Embora a vazão do afluente seja capaz de encher o reservatório sem a necessidade de bombeamento de água do rio principal, o modelo não agrega a hidroeletricidade adicional geração do rio tributário onde o reservatório superior da UHR é construído. Isso ocorre porque é complicado comparar energia hidrelétrica e armazenamento energético. A energia hidrelétrica gera eletricidade e a UHR armazena energia. Incluir ambas as alternativas no modelo confundiria a análise.</p>

Complementaridade de energia e água	As necessidades de armazenamento energético e hídrico com as usinas UHR devem ser complementares. Isso ocorre porque durante a estação seca haverá poucos volumes de água disponíveis para serem usados para armazenamento energético. Essa complementaridade costuma ocorrer em países de latitude alta, onde durante o verão o fluxo do rio é maior devido ao degelo e a demanda de energia é menor em comparação com o inverno. Regiões intertropicais com geração abundante de energia hidrelétrica também têm complementaridade, onde durante a estação chuvosa há alta disponibilidade de água e geração de energia hidrelétrica. Porém, existem regiões onde a necessidade de armazenamento energético e hídrico não são complementares, por exemplo, nas regiões intertropicais sem geração hidrelétrica, onde o verão e a estação chuvosa são os períodos de maior demanda de eletricidade devido ao ar condicionado. Outros casos de falta de complementaridade podem ocorrer em locais onde a estação seca tem maior geração de energia solar, ou estação chuvosa com baixa geração de energia solar, ou alta demanda de eletricidade e risco de inundação, etc. Nos casos em que as necessidades de energia e armazenamento hídrico não são complementares, UHR não deve ser considerado como uma alternativa de armazenamento energético e hídrico. Exceções podem ser feitas para projetos de UHR que possuem quedas superiores a 800 metros, nos quais baixos volumes de água podem armazenar grandes volumes de energia.
Necessidades de energia e água	As necessidades de armazenamento energético e hídrico não estão incluídas neste documento e são um aspecto importante ao planejar uma planta de UHR.
Zonas de restrição	O modelo assume apenas aspectos técnicos de projetos UHR. Restrições como biodiversidade, reassentamento populacional, opinião social, edifícios históricos, áreas de proteção ambiental e zonas de conflito não foram incluídas na análise. Essas restrições teriam um impacto considerável na capacidade estimada e nos custos de armazenamento hídrico e energético. Novos estudos devem ser implementados para incluir considerações acerca da restrição mencionada acima e de outras restrições.
Lagos	Os lagos existentes não estão incluídos como possibilidades de reservatório inferior. A vantagem de usar um lago como reservatório inferior é que existem restrições muito menores para o bombeamento de água de um lago, quando comparado a um rio.
Limitações dos parâmetros do modelo	O modelo foi projetado para ter o mínimo possível de restrições. No entanto, o modelo estava demorando muito para convergir. Assim, restringimos o valor de alguns parâmetros para reduzir o tempo computacional. A execução apresentada neste relatório levou uma semana para convergir com um desktop com processador Intel Core i7-6700, 3,4 GHz x 2. As principais restrições apresentadas na Tabela 3.
Outra informação	

Vários serviços complementares	Cada projeto pode ser usado para fornecer serviços múltiplos e complementares. No entanto, seria confuso combinar serviços nesse relatório, já que cada local tinha necessidades diferentes de água e energia. Assim, decidimos apresentar somente custos de armazenamento energético. Se a planta UHR for usada tanto para armazenamento energético como hídrico, o custo de armazenamento energético e hídrico será reduzido, pois ambos os serviços contribuirão para a viabilidade do projeto.
Capacidade instalada	O custo da capacidade instalada das UHR inclui apenas os custos dos túneis, turbina, escavação e equipamento elétrico, excluindo barragem e custo do terreno. Isso é definido propositalmente para permitir que o leitor projete seus próprios projetos de UHR.
Comparação com outras tecnologias de armazenamento energético de curto prazo	Atualmente, o UHR é a alternativa mais econômica para o armazenamento energético de curto prazo, porém, com a redução no custo das baterias é possível que as baterias fiquem mais baratas do que as usinas de UHR. A UHR pode fornecer serviços de armazenamento de longo e curto prazo. Essa combinação de serviços pode aumentar ainda mais a viabilidade de UHR para armazenamento de curto prazo, devido à oferta de dois serviços com a mesma usina. Por outro lado, as usinas UHR com quedas baixas ou túneis longos, ou seja, com custos de alta capacidade instalada por GW, podem não ser capazes de competir com o custo de armazenamento energético de curto prazo fornecido pelas baterias. Nesses casos, a operação das usinas UHR se concentraria no armazenamento energético apenas para o longo prazo e em momentos cruciais da rede quando a geração de pico é necessária.
Validação do modelo	Validamos diferentes aspectos do modelo separadamente. Por exemplo, (Gimeno-Gutiérrez and Lacal-Aránzaga 2015; Rogeau, Girard, and Kariniotakis 2017) também usaram dados topográficos SRTM para estimar o volume de seus reservatórios e validaram sua capacidade de armazenamento de reservatórios com uma amostra de reservatórios ou lagos com volumes conhecidos, e mostraram que o erro na estimativa de armazenamento hídrico foi pequeno. A referência de onde a análise de custos foi tirada (Slapgard 2012) é validada pela vasta experiência de construção de usinas hidrelétricas na Noruega. Os custos finais para armazenamento energético com UHR são semelhantes aos custos apresentados na literatura de 400 a 800 €/KW e 5 a 150 €/KWh (Zakeri and Syri 2015). Outra abordagem para validar o modelo é verificar visualmente as Figuras 14 a 40 se os projetos de UHR propostos seguem as especificações do modelo.

Fonte: Elaboração própria.

2.6 Sugestões de Melhorias para o Modelo no Futuro

Esse relatório apresentou avanços metodológicos e computacionais que aprimoraram substancialmente o modelo desenvolvido em (J. Hunt et al. 2020), com o objetivo de mapear UHR com ciclos diários, semanais, mensais e sazonais no Brasil. Porém, ainda existem diversas melhorias que podem ser implementadas. A Tabela 5 abaixo apresenta alguns desses ajustes.

Tabela 5: Propostas de aprimoramento no modelo computacional de mapeamento do potencial de UHR no Brasil.

Propostas	Descrição
Aumento da resolução da topografia	<p>Aumento da resolução da topografia para 3 segundos (90m x90m no equador), ou 1 segundo (30m x 30m). Dados de topografia de 3 e 1 segundos já estão disponíveis. Isso vai aprimorar substancialmente os resultados do modelo, porque no momento a resolução é de 450 metros, que é equivalente a uma barragem de médio porte. Com a topografia de 3 a 1 segundos a estimativa do custo da barragem será mais precisa do que a estimada com o modelo usada nesse relatório. A menor resolução também aprimorará a estimativa do comprimento da tubulação necessária, mas como a tubulação tende a ser mais longa do que a barragens, o benefício da maior resolução não é tão grande.</p> <p>Os desafios para o aumento da resolução da topografia são:</p> <ol style="list-style-type: none">1) O tempo necessário para o modelo computacional desenvolver projetos no Brasil aumentaria de uma semana para seis meses se a resolução for de 3 segundos, e cinco anos utilizando a resolução de 1 segundo.2) Com o aumento da resolução do modelo, o computador necessita substancialmente de mais memória RAM.3) Os dados hidrológicos têm que ser derivados dos mesmos dados de topografia. Talvez seja necessário criar os dados de rede fluvial.
Aprimorar dados hidrológicos	<p>Uso de dados hidrológicos específicos para o Brasil que descrevam com acurácia a hidrologia disponível para ser armazenada nos rios Brasileiros. Esses dados deveriam ter resolução mensal ou menor. Desenvolver uma metodologia nova para estimar os períodos que a água pode ser armazenada e quando UHR deve disponibilizar água para o uso a jusante da UHR, incluindo possíveis ciclos semanais acompanhando as chuvas de cada região.</p>
Transmissão	<p>Incluir a disponibilidade de transmissão próximo a UHR, e os custos necessários para conectar a UHR com a rede elétrica</p>
Custo de eletricidade	<p>Adequar as estimativas do custo de eletricidade previsto para os próximos 10 a 50 anos no Brasil, e as estimativas de fator de capacidade das UHR para aprimorar o dimensionamento das tubulações.</p>
Custo da terra	<p>Adicionar dados de custos da terra em todo o Brasil para estimar os custos do reservatório.</p>

Outros Custos	Incluir todos os custos que podem ser modelados automaticamente no desenvolvimento dos projetos.
Áreas de restrição ambiental	Incluir áreas de restrição ambiental no modelo.
População	Incluir dados de população que necessita ser realocada com a construção dos projetos de UHR.
Cobertura vegetal	Incluir dados de cobertura vegetal que precisa ser removida para a construção da UHR.
Geologia	Incluir dados de geológicos na modelagem para indicar se a região é propícia para a construção de reservatórios.
Outras melhorias	Resolver as limitações mencionadas na Erro! Resultado não válido para índice..

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados do mapeamento do potencial de UHR diária e sazonal e UHR sazonal é apresentado em figuras no Anexo 1.

3. Considerações Finais

O presente relatório apresentou a metodologia utilizada para o mapeamento do potencial de armazenamento energético do Brasil, considerando a implementação de UHR de ciclos diário, semanais, mensais, sazonais e plurianuais.

O modelo consiste no aprimoramento da metodologia desenvolvida em (J. Hunt et al. 2020) e de sua adequação para o caso brasileiro. O relatório também apontou as principais limitações e possíveis melhorais do modelo.

Referências Bibliográficas

Akhil, A., G. Huff, A. Currier, B. Kaun, D. Rastler, S. Chen, A. Cotter, D. Bradshaw, and W. Gauntlett. 2013. "DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA." Albuquerque.

"Cost Base for Hydropower Plants (With a Generating Capacity of More than 10,000 KW). Published by: Norwegian Water Resources and Energy Directorate. Editor: Jan Slagård. Authors: SWECO Norge AS." n.d.

Federal Interagency Stream Restoration Working Group. 1998. *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*.

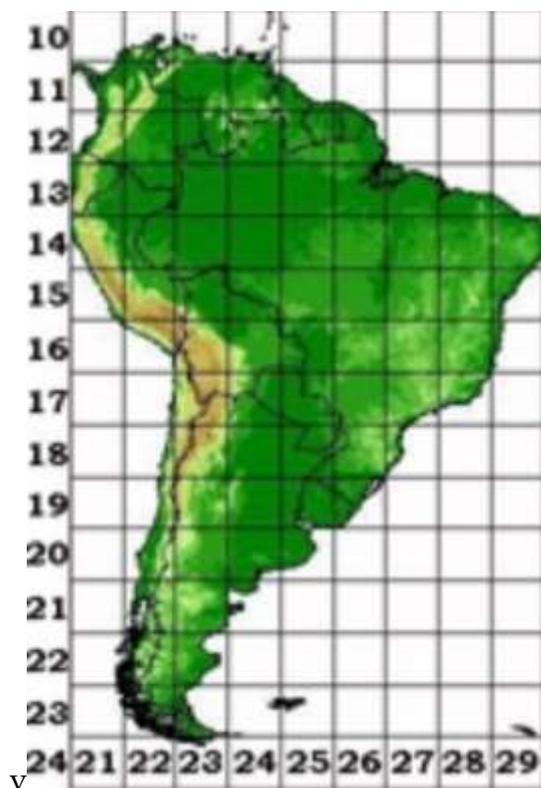
- Gernaat, David E H J, Patrick W Bogaart, Detlef P van Vuuren, Hester Biemans, and Robin Niessink. 2017. "High-Resolution Assessment of Global Technical and Economic Hydropower Potential." *Nature Energy* 2 (10): 821–28. <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0006-y>.
- Ghorbani, N, H Makian, and C Breyer. 2019. "A GIS-Based Method to Identify Potential Sites for Pumped Hydro Energy Storage - Case of Iran." *Energy* 169: 854–67. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.073>.
- Gimeno-Gutiérrez, M., and R. Lacal-Arántegui. 2015. "Assessment of the European Potential for Pumped Hydropower Energy Storage Based on Two Existing Reservoirs." *Renewable Energy* 75: 856–68.
- Hoes, O.A.C., L.J.J. Meijer, R.J. Van Der Ent, and N.C. Van De Giesen. 2017. "Systematic High-Resolution Assessment of Global Hydropower Potential." *PLoS ONE* 12 (2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171844>.
- Hunt, J., E. Byers, K. Riahi, and S. Langan. 2018. "Comparison between Seasonal Pumped-Storage and Conventional Reservoir Dams from the Water, Energy and Land Nexus Perspective." *Energy Conversion and Management* 166: 385–401.
- Hunt, J., E. Byers, Y. Wada, S. Parkinson, D. Gernaat, S. Langan, D. Vuuren, and K. Riahi. 2020. "Global Resource Potential of Seasonal Pumped-Storage for Energy and Water Storage." *Nature Communications* 11 (947): Article number: 947.
- Hunt, J.D., M.A.V. Freitas, and A.O. Pereira Junior. 2014. "Enhanced-Pumped-Storage: Combining Pumped-Storage in a Yearly Storage Cycle with Dams in Cascade in Brazil." *Energy* 78. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.038>.
- Information, CGIAR - Consortium for Spatial. 2017. "SRTM 90m Digital Elevation Data." 2017.
- International Electrotechnical Commission. 2011. "Electrical Energy Storage: White Paper." Geneva.
- International Energy Agency. 2014. "Technology Roadmap: Energy Storage." Paris.
- — —. 2015. "Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells." Paris.
- International Hydropower Association. 2019. "Pumped Storage Tracking Tool." 2019. <https://www.hydropower.org/hydropower-pumped-storage-tool>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). 2019. "Renewable Energy Statistics 2019."

- Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara. 2008. "Hole-Filled Seamless SRTM Data V4." International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). 2008.
- Kelman, R., and D. Harrison. 2019. "Integrating Renewables with Pumped Hydro Storage in Brazil: A Case Study." *HAL* hal-021477.
- Lacal-Aránegui, R., N. Fitzgerald, and N. Leahy. 2012. "Pumped-Hydro Energy Storage: Potential for Transformation from Single Dams." JRC Scientific and Technical Reports. Petten. 2012.
- Lu, Bin, Matthew Stocks, Andrew Blakers, and Kirsten Anderson. 2018. "Geographic Information System Algorithms to Locate Prospective Sites for Pumped Hydro Energy Storage." *Applied Energy* 222: 300–312. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.177>.
- Luo, X., J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke. 2015. "Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation." *Applied Energy* 137: 511–36.
- Petheram, C., J. Gallant, and A. Read. 2017. "An Automated and Rapid Method for Identifying Dam Wall Locations and Estimating Reservoir Yield over Large Areas." *Environmental Modelling and Software* 92: 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.016>.
- Rehman, Shafiqur, Luai M. Al-Hadhrami, and Md. Mahbub Alam. 2015. "Pumped Hydro Energy Storage System: A Technological Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44: 586–98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.040>.
- Renewable Energy Association. 2016. "Energy Storage in the UK: An Overview." London.
- Rogeanu, A, R Girard, and G Kariniotakis. 2017. "A Generic GIS-Based Method for Small Pumped Hydro Energy Storage (PHES) Potential Evaluation at Large Scale." *Applied Energy* 197: 241–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.103>.
- Rognlien, L. 2012a. "Pumped Storage Development in Øvre. Otra, Norway. MSc Thesis." *Norwegian University of Science and Technology*. Otra.
- — — . 2012b. "Pumped Storage Development in Ovre." Otra, Norwegian University of Science and Technology. Norway.
- Schneider, A., Jost, A., Coulon, C., Silvestre, M., Théry, A. Ducharme, A. 2017. "Global Scale River Network Extraction Based on High-Resolution Topography and Constrained by Lithology, Climate, Slope, and Observed Drainage Density." *Geophysical Research Letters* 44: 2773–2781. <https://doi.org/10.1002/2016GL071844>.

- Schneider, A, Anne Jost, Cecile Coulon, Marie Silvestre, Sylvain Théry, and Agnès Ducharne. 2017. "Global Scale River Network Extraction Based on High-Resolution Topography and Constrained by Lithology, Climate, Slope, and Observed Drainage Density: Global Scale River Network Extraction." *Geophysical Research Letters*.
<https://doi.org/10.1002/2016GL071844>.
- Slapgard, Jan. 2012. "Cost Base for Hydropower Plants." Norwegian University of Science and Technology. Oslo.
- Stocks, M., A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng, and A. Nadolny. 2019. "A Global Atlas of Pumped Hydro Energy Storage." 2019.
<https://nationalmap.gov.au/renewables/#share=s-oDPMo1jDBBtwBNhD>.
- TCU. 2010. "TC 026.091/2010-0 - Leilão Para Contratação de Energia Proveniente de Novos Empreendimentos de Geração, No Ambiente de Contratação Regulada (a-5). Aproveitamentos Hidrelétricos de Teles Pires, Sinop, Estreito, Ribeiro Gonçalves e Cachoeira."
- USA Department of Energy, and Sandia National Laboratories. 2019. "DOE Global Energy Storage Database." 2019.
<https://www.energystorageexchange.org/>.
- Vliet, M.T.H. van, L.P.H. van Beek, S. Eisner, M. Flörke, Y. Wada, and M.F.P. Bierkens. 2016. "Multi-Model Assessment of Global Hydropower and Cooling Water Discharge Potential under Climate Change." *Global Environmental Change* 40: 156–70.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.07.007>.
- Wada, Yoshihide, Inge Graaf, and Ludovicus van Beek. 2016. "High-Resolution Modeling of Human and Climate Impacts on Global Water Resources." *Journal of Advanced in Modeling Earth Systems* 8 (2): 735–63.
- World Energy Council. 2016. "World Energy Resources: E-Storage." London.
- Zakeri, Behnam, and Sanna Syri. 2015. "Electrical Energy Storage Systems: A Comparative Life Cycle Cost Analysis." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42: 569–96.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>.
- Zhou, Y., M. Hejazi, S. Smith, J. Edmonds, H. Li, L. Clarke, K. Calvina, and A. Thomsona. 2015. "A Comprehensive View of Global Potential for Hydro-Generated Electricity." *Energy & Environmental Science* 8 (9): 2622–33.

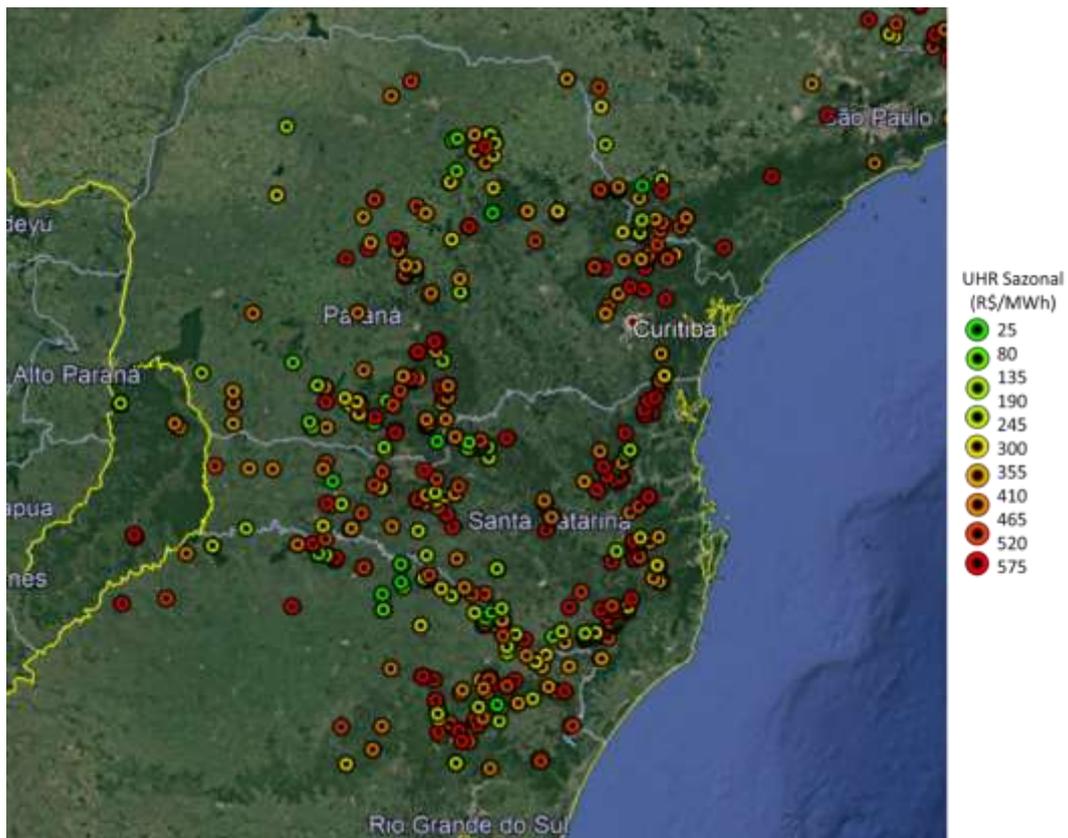
Anexo 1 - Mapeamento de todos os projetos de UHR

Figura 13: Mapa topográfico utilizado no modelo descrito nesse relatório, dividido em blocos 5x5 graus de latitude e longitude.



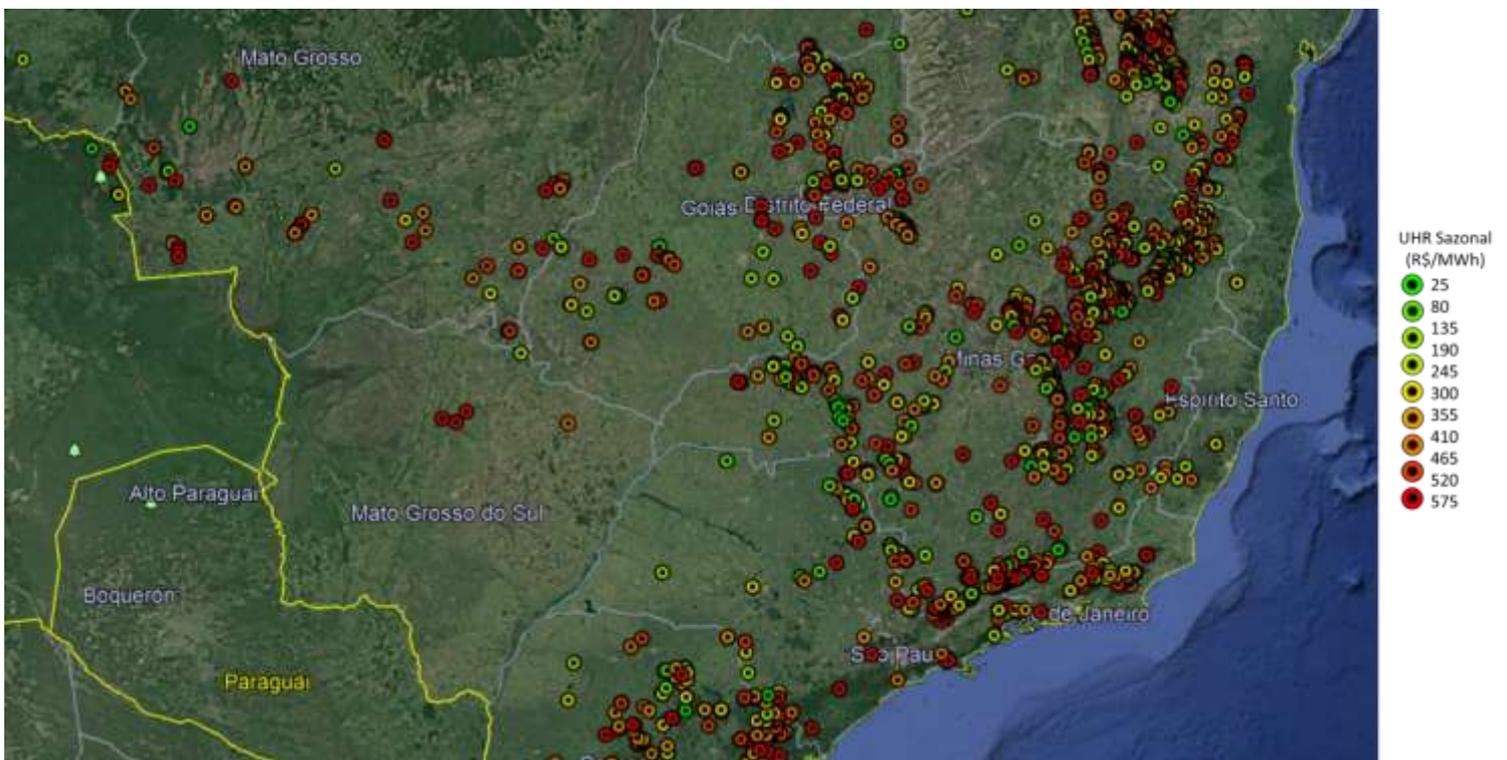
Fonte: (Information 2017).

Figura 14: Potencial de UHR Sazonal na Região Sul do Brasil.



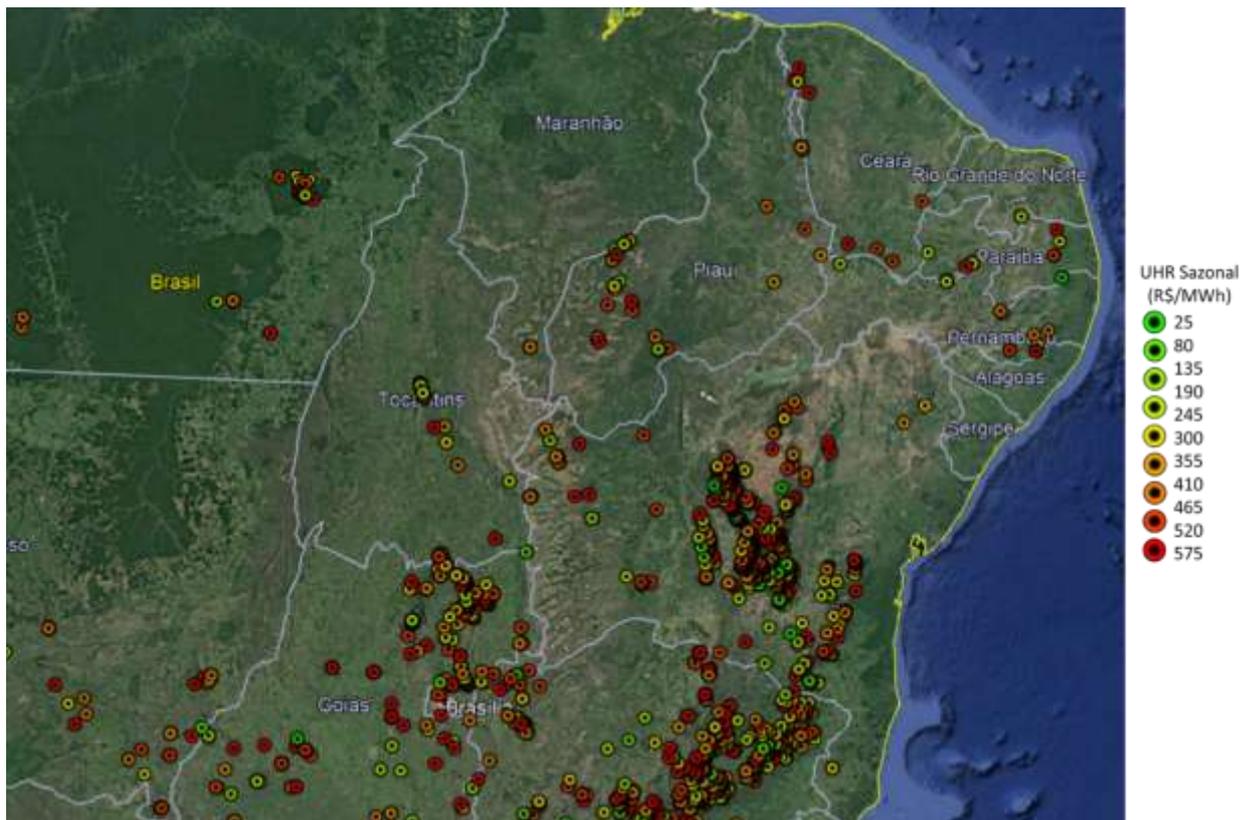
Fonte: Elaboração própria.

Figura 15: Potencial de UHR Sazonal na Região Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.



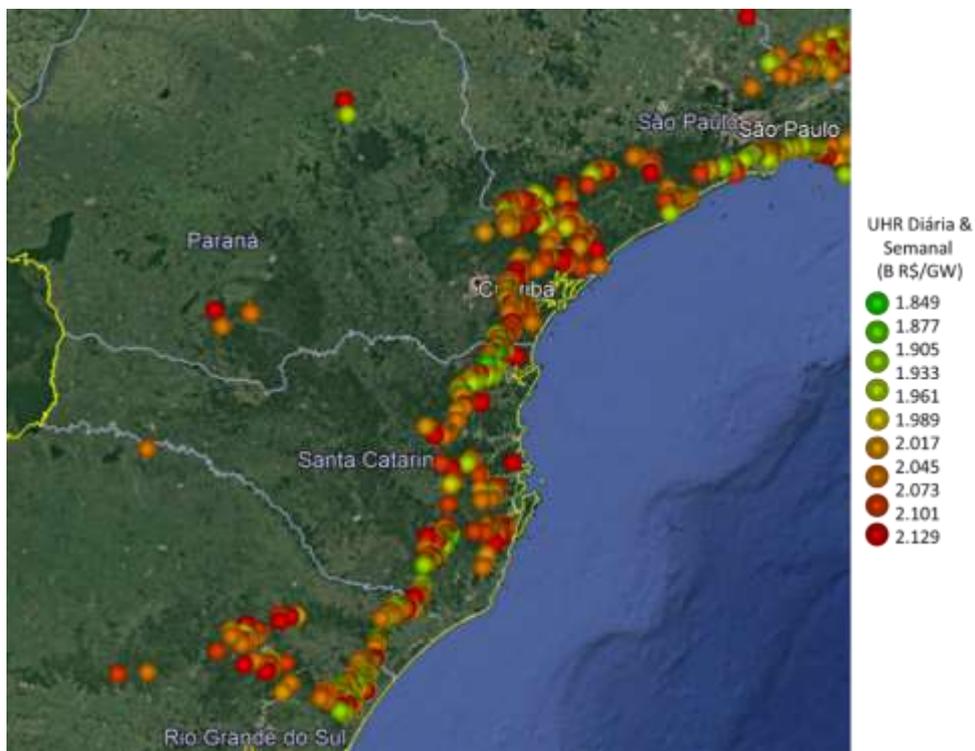
Fonte: Elaboração própria.

Figura 16: Potencial de UHR Sazonal na Região Nordeste e Norte do Brasil.



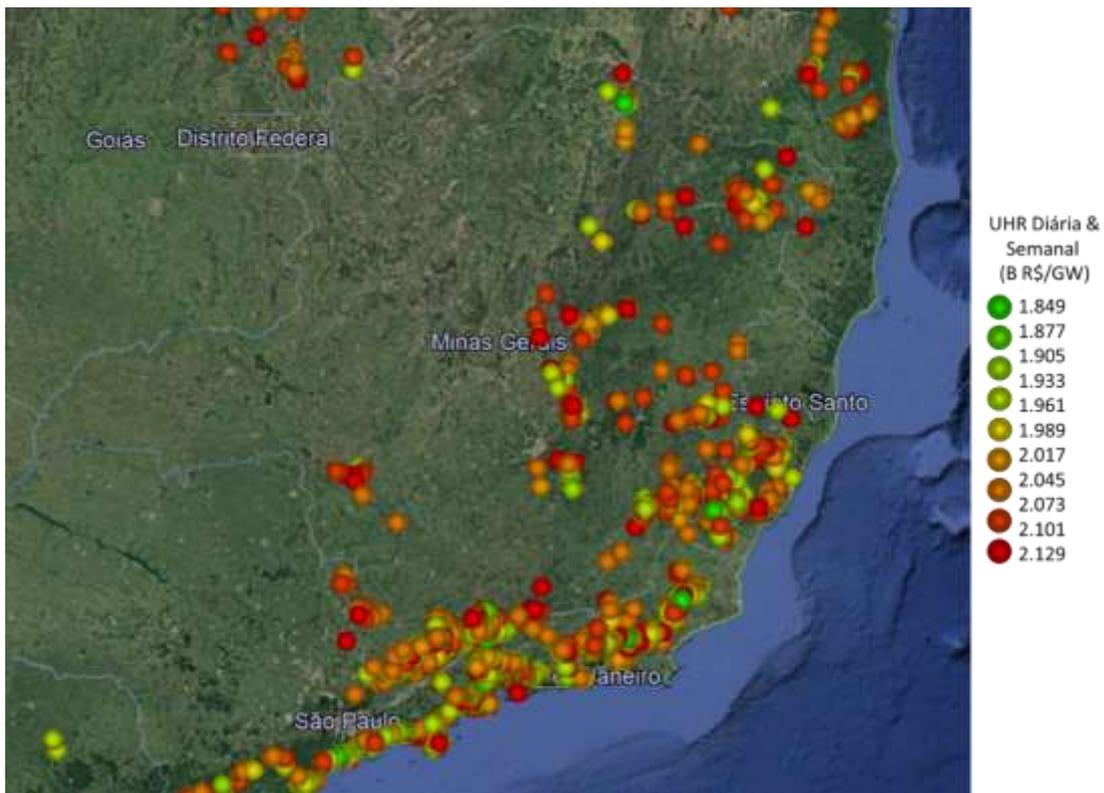
Fonte: Elaboração própria.

Figura 17: Potencial de UHR Diária e Semanal na Região Sul do Brasil.



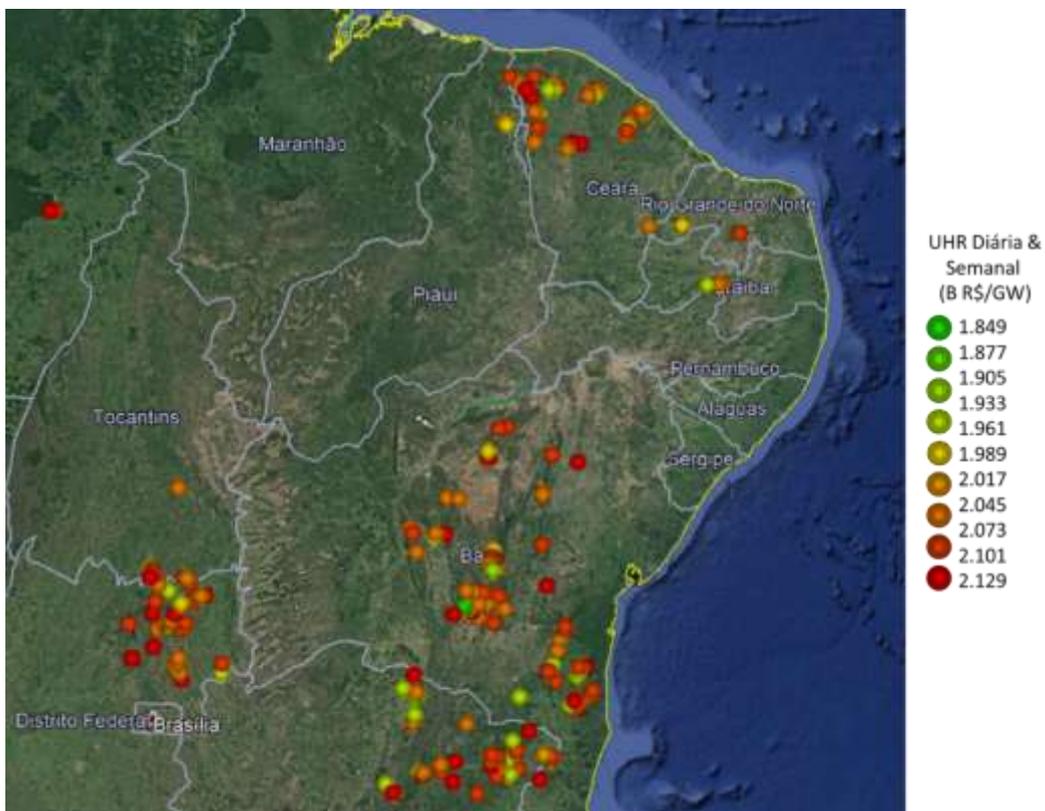
Fonte: Elaboração própria.

Figura 18: Potencial de UHR Diária e Semanal na Região Sudeste do Brasil.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 19: Potencial de UHR Diária e Semanal na Região Nordeste do Brasil.



Fonte: Elaboração própria.