

USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS SAZONAIS E SEUS BENEFÍCIOS PARA O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Dr. Julian David Hunt ¹, Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas¹

¹Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais,
COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Rio de Janeiro, Brasil

Resumo— Como a geração elétrica do país depende muito da geração hidrelétrica, há momentos em que a água armazenada é utilizada para garantir a geração elétrica e o abastecimento hídrico para outras atividades é comprometido. Desta forma, é importante aumentar o armazenamento energético do país. Esse artigo aponta o potencial de Usinas Hidrelétricas Reversíveis Sazonais no Brasil (UHRS) e seus benefícios para os setores hídrico e energético. Tendo em vista, aumentar a capacidade de armazenamento hídrico e energético do Brasil através do armazenamento do excedente energético das hidroelétricas na Bacia Amazônica, que tem baixa capacidade de armazenamento, durante o período úmido, e utilizá-lo durante o período seco, quando se tem menor disponibilidade hídrica, removendo a necessidade de geração térmica cara e poluente.

Palavras Chave — *Armazenamento Energético, Armazenamento Hídrico, Usinas Hidrelétricas Reversíveis, Geração de Ponta, Eficiência Energética.*

I. INTRODUÇÃO

O Brasil gera grande parte de sua eletricidade com a fonte hídrica, o que tem benefícios, como o menor custo, porém sofre com a imprevisibilidade de geração, vulnerabilidade às mudanças climáticas e com os múltiplos usos da água. Em anos com baixa disponibilidade hídrica, a água armazenada nos reservatórios de acumulo é utilizada para garantir a geração elétrica. Como a geração elétrica do país depende muito da geração hidrelétrica, há momentos em que a água armazenada é utilizada para garantir a geração elétrica e o abastecimento hídrico para atividades humanas e para o meio ambiente é comprometido. Por exemplo, em 2013 e 2014 grande parte da água armazenada no Reservatório de Paraibuna, na cabeceira da Bacia do Rio Paraíba do Sul, foi utilizada para gerar eletricidade devido a crise energética. Em janeiro de 2015 o reservatório ultrapassou o nível morto, restringindo a água para o abastecimento hídrico, e comprometendo a qualidade da água no Rio Paraíba do Sul [1]. Um cenário parecido está acontecendo na bacia do Rio São Francisco. O abastecimento hídrico na bacia pode ser comprometido nos próximos anos, caso os recursos hídricos não sejam geridos de forma apropriada [2]. Desta forma,

medidas para diminuir a vulnerabilidade do setor elétrico tem um impacto direto na disponibilidade de recursos hídricos do país.

Uma alternativa para reduzir a vulnerabilidade do setor elétrico é o armazenamento de energia. Usinas hidrelétricas reversíveis (UHR) são amplamente utilizadas para armazenar energia [3] e novos estudos mostram um grande potencial de implementação da tecnologia no Brasil [4]. À noite, quando a demanda de eletricidade é baixa, o excesso de geração é armazenado com o bombeamento de água de um reservatório inferior para um reservatório superior [5]. Durante o dia, quando a demanda aumenta, a energia armazenada é transformada em eletricidade. Porém, há uma perda de 15% a 30% durante o processo de armazenamento e a geração elétrica em sistemas de UHR [6]. UHR já foram implementadas com sucesso na China [7], Japão [8], Estados Unidos [9] e na Europa [10].

UHRS é um conceito novo que pode trazer grandes benefícios para o setor hídrico e elétrico brasileiro. Ao contrário de uma usina hidrelétrica reversível convencional (UHR) que opera com o ciclo de um dia, uma UHRS opera com o ciclo de um ano. Isso acarreta em grandes diferenças na construção e operação entre UHR e UHRS que são apresentadas nesse artigo.

II. METODOLOGIA

UHRS consiste na criação de um novo reservatório, com 200 metros (ou mais) acima do reservatório ou rio inferior, localizado perto do topo de uma série de hidrelétricas em cascata. O reservatório superior deve ter uma formação geológica impermeável e estável. Quanto maior a diferença de altura entre os dois reservatórios, menor diâmetro terão as tubulações para gerar a mesma quantidade de energia e menor será a área inundada para o armazenamento energético. Quanto maior a variação da altura no reservatório superior, menor será a área inundada e evaporação. O reservatório inferior ou o fluxo do rio devem ter água o suficiente de modo que as bombas possam operar durante todo o período úmido.

Uma bacia hidrográfica com hidrelétricas em cascata funciona da forma representada na Figura 1 (a) onde a seta

azul representa o fluxo de água que passa pelas hidrelétricas gerando eletricidade. As usinas com reservatórios têm o potencial de armazenar água e energia, alterando o fluxo normal do rio, as usinas a fio d'água não alteram, de forma expressiva, o fluxo do rio. O planejamento dos reservatórios e das turbinas é feito com o intuito de manter a geração elétrica otimizada e constante durante o ano, para diminuir o custo da eletricidade.

usina da cascata, f é a vazão total resultante da água armazenada na UHRS (kg/s), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), ρ é a densidade da água (kg/m^3) e e é a eficiência de geração hidrelétrica, que nesse artigo é de 90%. Note que, uma vez cheio o reservatório da UHRS, a UHRS opera como uma usina hidrelétrica convencional.

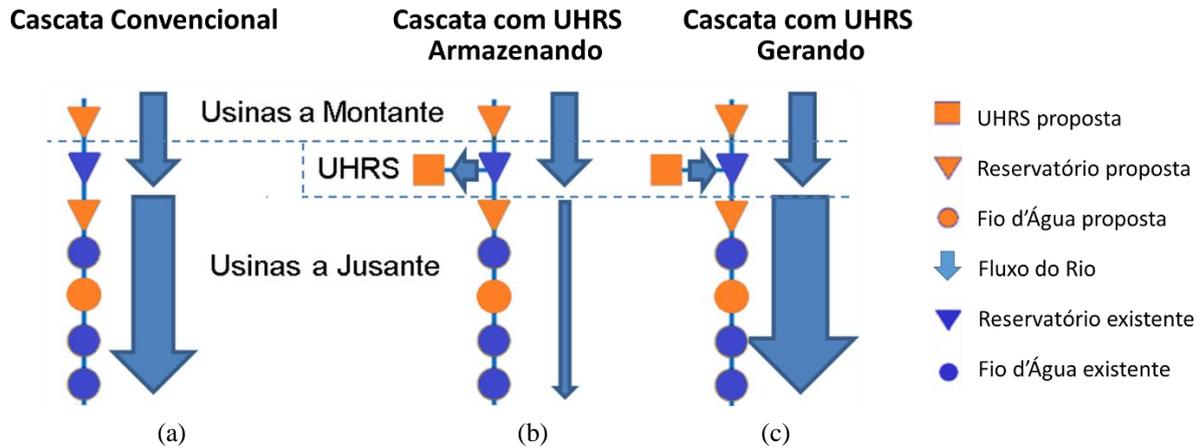


Figura 1: Operação de (a) usinas hidrelétricas convencionais (b) UHRS durante períodos de alta disponibilidade hídrica (c) UHRS durante períodos de baixa disponibilidade hídrica.

Com a combinação de uma Usina Hidrelétrica Reversível Sazonal e hidrelétricas em cascata, Figura 1 (b) e (c), é possível alterar o fluxo de uma bacia hidrográfica de acordo com a necessidade de armazenamento energético e geração elétrica [11]. A Figura 1 (b) representa o processo de armazenamento hídrico e energético que acontece quando há alta disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica em questão e/ou quando há sobra de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN). A sobra de energia no SIN é utilizada para bombear água para a UHRS e reduzir a geração de eletricidade nas hidrelétricas em cascata. O armazenamento energético na UHRS tem uma eficiência de 70-75%. Com a inclusão das usinas hidrelétricas em cascata, a eficiência de armazenamento aumenta consideravelmente, podendo até resultar em um ganho de geração caso resulte na redução do vertimento e/ou evaporação de água. Durante períodos de baixa disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica e/ou quando há escassez de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) a UHRS gera eletricidade utilizando a água armazenada posteriormente e aumenta a geração das hidrelétricas em cascata a jusante, como mostra a Figura 1 (c).

A equação utilizada para calcular a energia armazenada nas UHRS reforçada é apresentada na Equação 1:

$$Energia\ Armazenada = \sum_{i=1}^n h_i f g \rho e \quad (1)$$

Onde a energia armazenada é calculada em joules (J), h_i é a queda na UHRS e nas usinas hidrelétricas em cascata (m), n é o número usinas na cascata, incluindo a UHRS, i é cada

A eficiência total de armazenamento da UHRS em combinação com as hidrelétricas em cascata pode ser estimada com as equações abaixo. A Equação 2 apresenta o cálculo da eficiência do sistema de armazenamento. Os ganhos energéticos com a redução do vertimento e evaporação nas hidrelétricas em cascata a jusante da UHRS são inclusos nas equações, diferentemente das equações apresentadas em [12].

$$ES = \frac{(H_{UHRS} + H_{jUHRS} - 0,25 \times H_{UHRS}) \times F \times g + V + E}{(H_{UHRS} + H_j) \times F \times g} \quad (2)$$

Onde:

ES = Eficiência do Sistema.

F = vazão de água bombeada para a UHRS (em m^3/s).

H_{UHRS} = Altura média de operação da UHRS (em metros).

H_{jUHRS} = Altura da queda das hidrelétricas a jusante da UHRS (em metros).

H_j = Altura da queda das hidrelétricas a jusante sem a UHRS (em metros)

V = Ganho de geração elétrica devido à redução do vertimento (em kWmed).

E = Ganho de geração elétrica devido à redução da evaporação (em kWmed).

g = Aceleração da gravidade (em m/s^2).

A eficiência do sistema será maior que 75%, podendo atingir 90%, sem considerar o ganho de geração elétrica

devido à redução do vertimento e à evaporação. Levando em consideração os ganhos de geração elétrica devido ao vertimento e à evaporação, a eficiência pode atingir 140% ou mais. Ou seja, uma UHRS pode aumentar a geração hidrelétrica total de uma bacia hidrográfica.

III. RESULTADOS

Dada a geologia montanhosa em torno da Usina Hidrelétrica Governador Bento Muñoz (UHE GBM), vários locais diferentes podem ser utilizados para construir uma UHRS usando a UHE GBM como o reservatório inferior. A Figura 2 apresenta três projetos de UHRS diferentes ao redor da UHE GBM. Cada projeto tem problemas e benefícios e para exemplificar a tecnologia a UHRS Palmital foi preliminarmente selecionada, uma vez que requer uma pequena barragem e uma curta tubulação adutora.

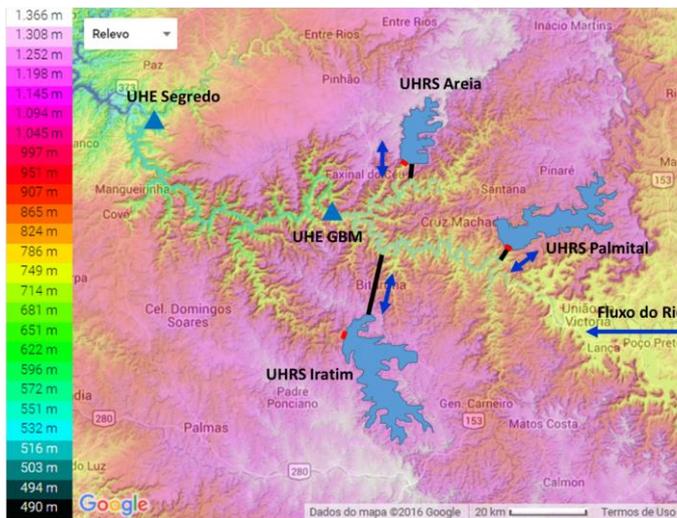


Figura 2: Três possíveis projetos de UHRS ao redor do GBM Dam.

A Figura 3 apresenta resultados preliminares para a construção da UHRS Palmital na Bacia do Rio Iguaçu. Esse projeto consiste em construir uma UHRS onde o reservatório inferior compreende a UHE GBM e o novo reservatório superior com uma barragem de 2 quilômetros de comprimento e altura máxima de 220 metros. O reservatório superior tem capacidade de armazenamento de 13.700 hm³ e 23,8 GWmed, o que equivale a 11,4% da capacidade de armazenamento do SIN.

Nessa conformação, 2 GW de eletricidade podem ser bombeados para o novo reservatório Palmital durante 6 meses, até encher o reservatório. A eletricidade utilizada para o bombeamento pode vir das futuras Usinas na Amazônia que gerarão um excedente de eletricidade durante o período úmido. Note que as perdas com o bombeamento acontecem quando o sistema está com excesso de energia. O bombeamento então diminui o desperdício de energia no sistema. Com o aumento do armazenamento hídrico, a geração hidrelétrica na cascata a jusante da UHRS Palmital diminuirá em 2,3 GW (incluindo ganhos com a água que seria vertida sem o aumento do armazenamento). Isso resulta em

uma redução total de 4,3 GW de geração durante o período úmido.

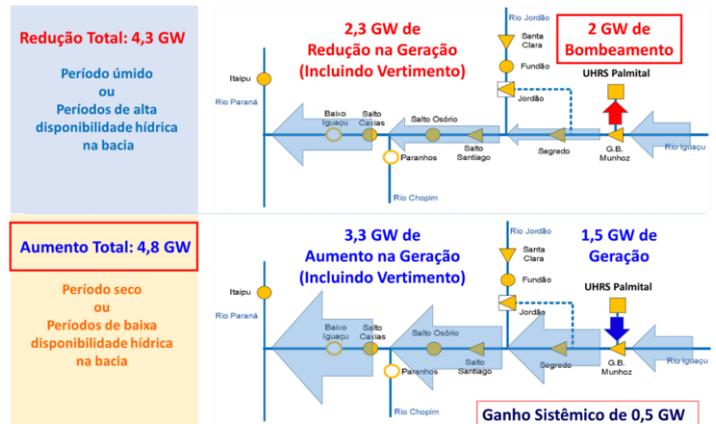


Figura 3: Diagrama representando a operação da UHRS Palmital na Bacia do Rio Iguaçu.

Durante o período seco, a UHRS Palmital gerará 1,5 GW durante 6 meses (incluindo as perdas com o processo de armazenamento) até esvaziar o reservatório, e aumentará a geração nas hidrelétricas em cascata em 3,3 GW (incluindo ganhos com a água que seria vertida sem o aumento do armazenamento). Isso resulta em um aumento total de 4,8 GW de geração durante o período úmido. Comparando com a redução no período úmido, existe um ganho sistêmico de 0,5 GW, incluindo as perdas com o bombeamento.

Resultados preliminares apontam um grande potencial de implementação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis Sazonais. A Figura 4 apresenta as áreas de captação de treze projetos de UHRS. A cor da área de captação corresponde a capacidade de armazenamento energético da UHRS. Note que esta capacidade de armazenamento assume o desenvolvimento completo das cascatas a jusantes às UHRS.

A região contornada em vermelho destaca a área que representa mais de 70% da capacidade de armazenamento energético do Brasil. Caso não chova nessa região durante o período úmido, a geração elétrica do Brasil durante o período seco é comprometida. A implementação de UHRS irá descentralizar o potencial de armazenamento energético do Brasil, aumentar a segurança energética do país e reduzir o risco de racionamento.

Os projetos foram desenvolvidos analisando a topografia do Brasil [13] para estimar a capacidade de armazenamento hídrico das UHRS e dados da vazão dos rios foram utilizados para estimar a redução da água vertida nas usinas em cascata a jusante das UHRS [14].

A Tabela I apresenta os detalhes dos treze projetos de UHRS desenvolvidos. Pode-se notar que caso todos os projetos sejam implementados, a capacidade de armazenamento energético do Brasil aumentaria em 140% e a área alagada seria de 3.314 km², menor que a área do Reservatório de Sobradinho.

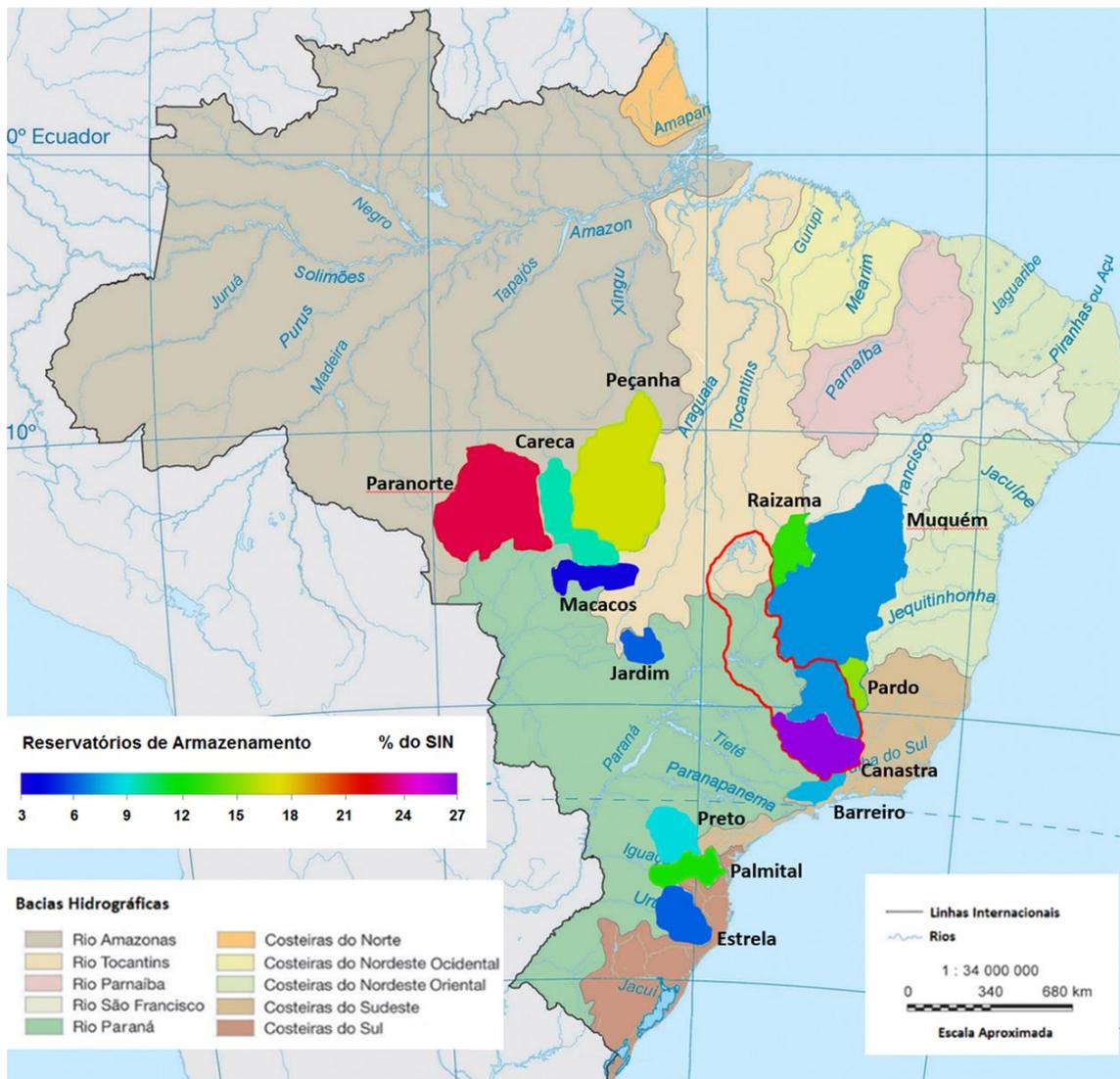


Figura 4: Área de captação dos projetos de UHRS e suas respectivas capacidades de armazenamento.

A Figura 5 apresenta a quantidade de área alagada para armazenar 1 GWmed em diferentes reservatórios do SIN. Como se pode perceber, para alguns projetos de UHRS analisados de forma preliminar, a área alagada representa entre 0-30 km² para armazenar 1 GWmed. Por exemplo, o melhor exemplo de UHRS, a UHRS Barreiro alaga 1,8 km²/GWmed, o que é 10 vezes menos que a Usina de Nova Ponte, que é a usina que armazena mais energia por área alagada do SIN, e alaga 19,6 km²/GWmed. A UHRS com o maior índice de alagamento, UHRS Careca com 22,4 km²/GWmed, alaga 135 vezes menos do que a Usina de Balbina, com 3045 km²/GWmed, que é a segunda usina que alaga mais por GWmed de armazenamento do SIN. Em síntese, a implantação de uma UHRS alaga uma área menor do que usinas convencionais com reservatório.

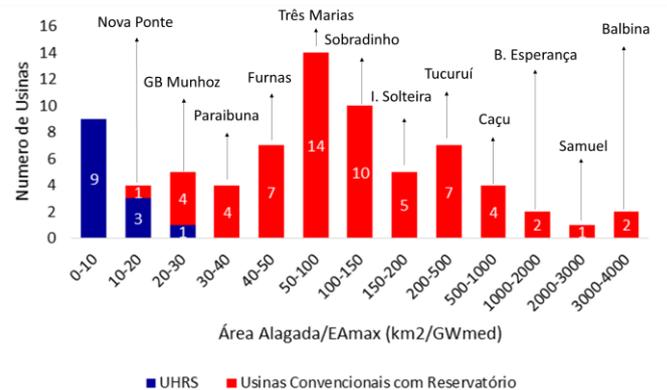


Figura 5 - Comparação de área alagada por potencial de armazenamento energético entre Usinas Hidrelétricas Reversíveis Sazonais e usinas hidrelétricas convencionais.

O custo estimado da construção de UHRS estão entre US\$ 2.000/kW e 5.000/kW. Mas, como a operação de UHRS

influencia a geração das hidrelétricas em cascata a jusante o custo total de armazenamento reduz para US\$ 1.000/kW - US\$ 3.000/kW.

UHRS funciona com um fator de capacidade médio de 40%. Isto é porque a metade do tempo, a UHRS armazena e a outra metade ela gera. Assim, levando em conta o custo de investimento apresentado acima do custo de geração será entre US\$ 40/MWh - US\$ 120/MWh, assumindo que a energia usada para bombear seria perdida. Usinas na Amazônia podem gerar eletricidade a um preço de US\$ 60/MWh. Com o objetivo de armazenar esta energia para o

período seco, a adição de armazenamento sazonal resultaria em um preço total de US\$ 100/MWh - US\$ 180/MWh.

IV. CONCLUSÕES

Em conclusão, este artigo mostrou a necessidade de aumentar o potencial de armazenamento de energia do Brasil e mostrou que isto é viável com a construção de UHRS em combinação com usinas em cascata. Além dos vários benefícios apresentados no artigo, UHRS tem o potencial de descentralizar a capacidade de armazenamento de energia no Brasil, que é focada na região Sudeste e faz com que o sector do elétrico seja vulnerável às alterações climáticas. A descentralização do potencial de armazenamento brasileiro aumenta a segurança energética do país, reduzindo assim o risco de racionamento de energia elétrica.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a CAPES para a bolsa de pesquisa no âmbito do programa Ciência sem Fronteiras e para o Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais pelo suporte acadêmico e técnico.

REFERÊNCIAS

- [1] Agencia Nacional de Águas, "Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul," ANA, Brasília, 2015.
- [2] Agencia Nacional de Águas, "Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul," ANA, Brasília, 2015.
- [3] P. Vennemann, K. Gruber, J. Haaheim and A. Kunsch, "Pumped storage plants - Status and perspectives", Essen: VGB PowerTech., 2011.
- [4] L. Nacif, F. Locatelli and R. Camargo, "Análise da Repotenciação de Usinas Hidrelétricas do SIN Utilizando Unidades Geradoras Reversíveis," in XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, Outubro de 2015.
- [5] F. Canales, A. Beluco and C. Mendes, "Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas," Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, vol. 19, no. 2, pp. 1230-1249, 2011.
- [6] M. Ricetta, A. Ohnuma and J. Fortes, "Usinas Hidrelétricas Reversíveis e o nexa água e energia," in XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, 2015.
- [7] Z. Ming, Z. Kun and L. Daoxin, "Overall review of pumped-hydro energy storage in China: Status quo, operation mechanism and policy barriers," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 17, p. 35-43, 2013.
- [8] D. Zhang, T. Chen and Y. Li, "Survey on pumped storage power stations in Japan," Southern Power System Technology, vol. 3, no. 5, pp. 1-5, 2009.
- [9] Y. C. and R. Jackson, "Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 1, pp. 839-844, 2011.
- [10] F. Geth, T. Brijis, J. Kathan, J. Driesen and R. Belmans, "An overview of large-scale stationary electricity storage plants in Europe: Current status and new developments," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, pp. 1212-1227, 2015.
- [11] J. Hunt, M. Freitas and A. Pereira Junior, "Aumentando a Capacidade de Armazenamento Energético do Brasil," in IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Florianópolis, 2014.
- [12] J. Hunt, M. Freitas and A. Pereira Junior, "Enhanced-Pumped-Storage: Combining pumped-storage in a yearly storage cycle with dams in cascade in Brazil," Energy, vol. 78, pp. 513-523, 2014.
- [13] Topographic-map, "Brasil," [Online]. <http://pt-br.topographic-map.com/places/Brasil-3559915/>. [Acessado em 12 Março 2016].
- [14] ONS, "Informativo Preliminar Diário da Operação". http://www.ons.org.br/publicacao/ipdo/Ano_2016/M%C3%AAAs_07/IPDO-07-07-2016.pdf. [Acessado em 12 Março 2016].

Tabela I

DETALHES DOS PROJETOS DE UHRS.

Nome	Rio	Volume Útil (hm ³)	Área Alagada (km ²)	Índice (km ² /GWmed)	Barragem (m)	Tubo (km)	Cota Mínima / Máxima (m)	Cota Inferior (m)	Vazão de Bomb. (m ³ /s)	Armaz. (GWmed/% do SIN)	Área de Drenagem (km ²)
Palmital	Iguaçu	13.700	177	5,35	220	4	850/1.000	742	868,8	33,1 / 11,4	30.100
Estrela	Uruguai	5.100	85	8,06	190	12/10	800/900	647	323,4	10,5 / 3,6	27.300
Preto	Ivaí e Tibagi	7.280	104	5,68	250	40	900/1.000	430/475	461,7	18,3 / 6,3	34.500
Raizama	Paraná	12.130	286	8,26	100	14	830/870	386	769,3	34,7 / 11,9	31.245
Jardim	Verde e Claro	5.551	61	6,10	155	13/11	700/830	560/550	352,0	10,0 / 3,4	15.700
Canastra	Grande	28.110	168	2,07	300	12	1050/1250	660	1782,7	80,9 / 27,7	59.500
Barreiro	Paraíba do Sul	4.000	29	1,82	260	12	1200/1450	460	253,7	15,89 / 5,5	13.400
Muquém	São Francisco	7.800	52	3,75	230	9	550/700	411	494,7	13,9 / 4,8	326.000
Pardo	Velhas	16.500	150	3,53	175	10	950/1100	540	1046,4	42,5 / 14,5	19.000
Peçanha	Xingu	36.400	615	12,99	122	9	440/530	260	2314,8	47,2/16,6	169.000
Careca	Teles Pires	21.390	508	22,22	102	17	350/420	302/292	1368,8	22,7 / 7,8	37.400
Paranorte	Tapajós	61.250	875	12,82	100	14	350/450	217	3938,4	68,2/23,3	156.000
Macacos	Mortos	8.400	204	18,18	100	9	550/620	480	540,1	11,2 / 3,9	16.000
Total		215.493	3314	8,13						409 / 140	935.145