



Políticas Energéticas para a Sustentabilidade
25 a 27 de agosto de 2014
Florianópolis – SC

Aumentando a Capacidade de Armazenamento Energético do Brasil

Julian David Hunt¹

Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas²

Amaro Olímpio Pereira Junior³

RESUMO

O Brasil está passando por uma transição energética já que a nova fronteira de geração hidrelétrica, a região Amazônica, não suporta hidrelétricas de armazenamento. Outra fragilidade no atual sistema energético é a centralização da capacidade de armazenamento na região Sudeste, especialmente nos Rios Paranaíba e Grande que juntos representam 45% da capacidade de armazenamento do país. Se o Brasil pretende gerar 80% de sua eletricidade a partir de hidrelétricas, ele terá que 1) aumentar a sua capacidade de armazenamento nas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste para gerar mais eletricidade no período seco e assim complementar o aumento da geração hidroelétrica na Bacia do Amazonas durante o período úmido, e 2) descentralizar a capacidade de armazenamento energético no Brasil para aumentar a segurança energética do país. Esse artigo argumenta que a nova técnica chamada *Enhanced-Pumped-Storage* é uma possível solução para o atual sistema energético brasileiro. *Enhanced-Pumped-Storage* combina a operação de centrais hidroelétricas reversíveis (CHR) de grande escala com hidrelétricas em cascata, onde a energia é armazenada com o bombeamento de água, no topo da cascata, para um reservatório superior durante o período úmido e,

¹Programa de Planejamento Energético/COPPE/UFRJ, julian.hunt@ppe.ufrj.br, +55 21 98923 2088.

²Programa de Planejamento Energético/COPPE/UFRJ, mfreitas@ppe.ufrj.br, +55 21 2562 8258.

³Programa de Planejamento Energético/COPPE/UFRJ, amaro@ppe.ufrj.br, +55 21 2562 8774.

durante o período seco, a eletricidade é gerada na CHR e em toda a cascata. Mesmo que as CHRs tenham eficiência média de 75%, foi calculado que a combinação da operação de uma CHR e de hidrelétricas em cascata pode aumentar a eficiência de armazenamento total para até 90% e triplicar a capacidade de armazenamento de uma bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Armazenamento Energético, Centrais Hidroelétricas Reversíveis, Hidroelétricas na Amazônia

ABSTRACT

Brazil is undergoing an energy transition as the new frontier of hydroelectric generation, the Amazon region, does not support energy storage reservoirs. Another weakness in the current energy system is the centralization of storage capacity in the Southeast, especially in the Grande and Paranaíba Rivers, which together represent 45% of the country's storage capacity. If Brazil wants to still generate 80% of its electricity from hydropower, it must 1) increase the storage capacity in the South, Southeast, Midwest and Northeast regions to generate more electricity in the dry period and thus complement the increase in hydroelectric generation in the Amazon Basin during the wet period, and 2) decentralize the energy storage capacity in Brazil to increase the country's energy security. This paper argues that a new technique called *Enhanced-Pumped-Storage* is a possible solution for the current Brazilian energy system. *Enhanced-Pumped-Storage* combines the operation of a large-scale pumped-storage site and hydroelectric dams in cascade, where energy is stored by pumping water at the top of the watershed, to a higher reservoir during the wet period and during the dry period, electricity is generated in the CHR and in the dams in cascade. Even though pumped-storage sites have an average efficiency of 75%, it was calculated that the combination of a PS site and a series of dams in cascade can increase the overall storage efficiency for up to 90%, and triple the storage capacity of a water basin.

Keywords: Energy Storage, Pumped-Storage, Amazon Dams

1. INTRODUÇÃO

A combinação de reservatórios de armazenamento e a fio d'água nas bacias hidrográficas brasileiras foi projetada para gerar uma quantidade constante de eletricidade ao longo do ano. De acordo com este esquema, durante o período chuvoso (dezembro a abril), a eletricidade é gerada e a água é direcionada para encher os reservatórios de armazenamento. Durante o período de seca (maio a

novembro), a água armazenada é usada para gerar eletricidade e o nível das barragens é reduzido. Este esquema permite que as hidrelétricas em cascata em uma bacia hidrográfica gerem uma quantidade relativamente constante de energia, aumentando a utilização da capacidade instalada de geração, reduzindo o custo da eletricidade na bacia hidrográfica.

Esta abordagem de geração hidrelétrica constante nas bacias hidrográficas brasileiras está atingindo seu limite viável. Reservatórios a fio d'água, que não têm capacidade de armazenamento e geram energia em proporção ao fluxo do rio, estão sendo construídos na região amazônica devido à sua formação geológica plana (EPE e MME, 2013). Está previsto um aumento na capacidade hidrelétrica brasileira de 40% até 2022, principalmente na região Amazônica. Porém, o aumento da capacidade de armazenamento será somente de 2%. Sem um aumento proporcional da capacidade de armazenamento, os reservatórios de acúmulo não terão capacidade suficiente para armazenar energia até ao final do período seco.

Soluções propostas para reduzir o desequilíbrio sazonal na geração hidrelétrica no Brasil foram estudadas. Da Silva et al. (2005) e Ricosti e Sauer (2013) mostram que a energia eólica no Nordeste brasileiro pode, até certo ponto, complementar a falta de geração hidrelétrica no período de seca na região. CEBDS (2013) mostra que a colheita de cana de açúcar acontece durante a estação seca e a combustão do bagaço tem o potencial de 15 GW de eletricidade.

Este artigo apresenta a técnica *Enhanced-Pumped-Storage*, que armazena energia em um ciclo anual, aumentando a capacidade de armazenamento energético do Brasil. Com isso, as barragens no Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste gerariam mais eletricidade durante o período seco, a fim de complementar a geração das novas barragens na região Amazônica, que gerarão a maior parte de sua eletricidade durante o período úmido.

2. ESCASSEZ DE ARMAZENAMENTO ENERGÉTICO NO BRASIL

Nos anos setenta, a água armazenada nos reservatórios, quando cheios, tinha capacidade para fornecer energia durante três a quatro anos. Hoje, com a atual demanda por energia, os reservatórios têm capacidade para fornecer energia por cerca de quatro meses, quando cheios (Godoi, 2013). A capacidade total de armazenamento vai parar de aumentar, mas a demanda mensal continuará aumentando. Assim, o Sistema Interligado Nacional (SIN) vai depender mais do

armazenamento energético, o que comprometerá a segurança energética do Brasil. Na Figura 1, a quantidade de meses de armazenamento energético é obtido pela divisão da linha 'Demanda Mensal' pela linha 'Armazenamento Mensal'. Deve-se notar que a 'Demanda Mensal' não é suprida somente com energia hidrelétrica. Fontes termelétricas e outras fontes de energia também contribuem para o abastecimento.

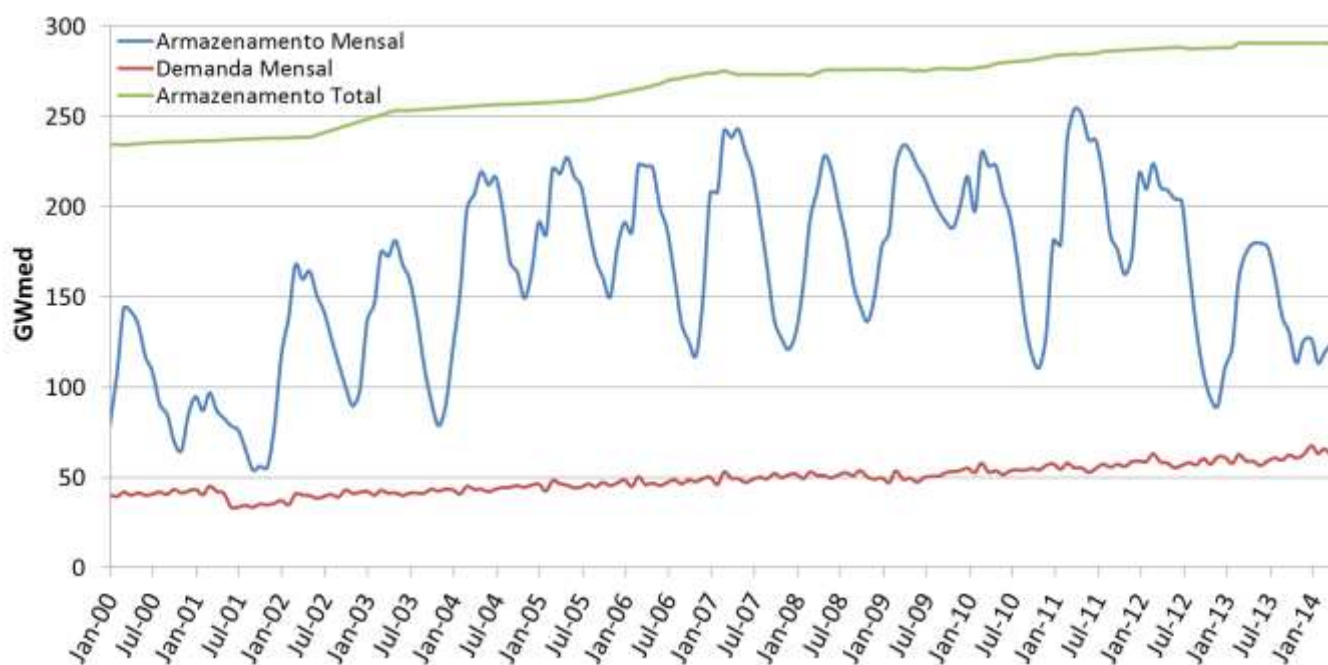


Figura 1 – Armazenamento mensal de energia hidrelétrica e demanda, e capacidade total de armazenamento no Brasil.

Como pode ser visto na Figura 1, em Julho de 2001, a demanda mensal teve que ser reduzida consideravelmente porque não havia suficiente energia armazenada. Isto resultou em uma profunda crise energética. Este gráfico mostra que a crise teve um impacto tão forte na economia que o consumo de energia só voltou ao mesmo patamar em Janeiro de 2005.

Um quadro similar está ocorrendo no início de 2014. O volume de água nos reservatórios na região Sudeste caiu para o mesmo nível que em 2001, 34% (ONS, 2014). No entanto, desde 2001, investimentos foram feitos para reduzir os riscos de uma nova crise energética (Maranhão, 2014). Novas linhas de transmissão foram instaladas, aumentando a capacidade de transmissão de uma região para outra. Em 2001, a eletricidade gerada no Sul ou no Norte não podia ser transmitida para o Sudeste e Nordeste, devido à falta de linhas de transmissão. O país também recebeu considerável reforço na capacidade de geração com usinas termelétricas e outras fontes renováveis, atingindo 33,8 GW em 2012 (EPE e MME, 2013). Mas o risco de racionamento ainda existe. Uma possível solução para o sistema elétrico brasileiro é

diversificar a capacidade de geração. Mas se o Brasil quiser manter 80% de sua geração elétrica a partir de hidrelétrica, sua capacidade de armazenamento energético terá que aumentar.

Outro problema é que as principais usinas hidrelétricas com reservatório estão na região Sudeste. Se houver um volume limitado de chuva nesta área, o fornecimento de energia durante o período seco no Brasil pode ser comprometido. Da capacidade de armazenamento brasileira, 70,1% está nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, 18,0% na região Nordeste, 6,9% na região Sul e 5,0% na região Norte. A Figura 2 mostra os reservatórios de armazenamento no Brasil, com suas respectivas capacidades de armazenamento.

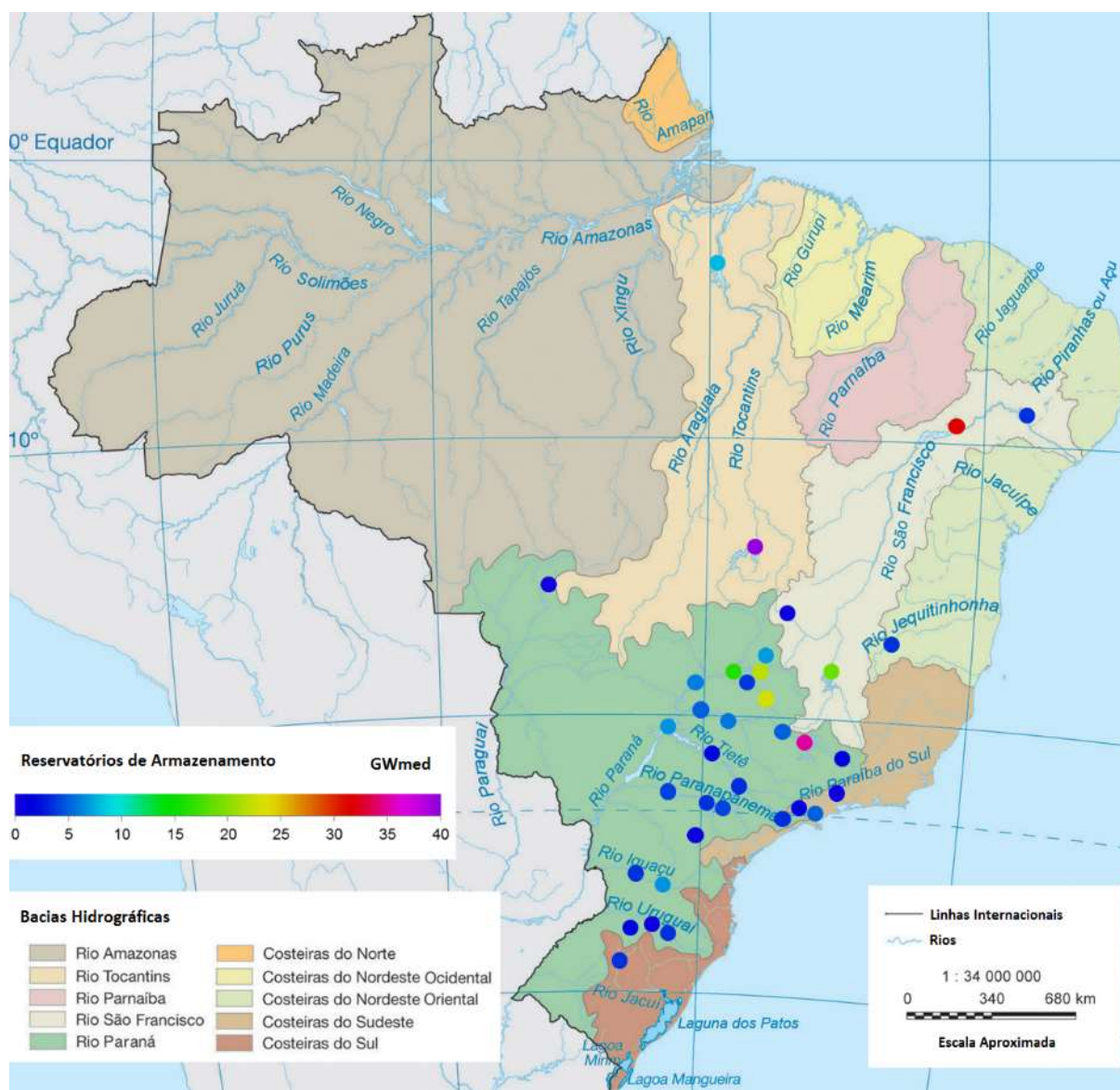


Figura 2 –Reservatórios de armazenamento no Brasil e suas capacidades de armazenamento.

O Brasil depende fortemente de chuvas na região Sudeste para armazenar energia até o final do período seco. Como choveu menos do que a média na região

durante 2012, 2013 e no início de 2014, o nível dos reservatórios está criticamente baixo, as usinas termelétricas estão operando em plena capacidade, o que irá contribuir com o aumento do preço da eletricidade e poderá resultar em uma nova crise energética em 2015 (Fariello, 2014).

Dadas as variabilidades climáticas, assumindo mudanças climáticas ou não, seria vantajoso construir reservatórios de armazenamento em locais com baixa capacidade de armazenamento para que o país dependa menos de chuvas nos rios Paranaíba e Grande, que garantem 45% do armazenamento energético do Brasil. Isso reduziria o risco de não ter energia armazenada para abastecer o país durante o período seco, aumentando a segurança energética do país.

3. DESEQUILÍBRIO NA GERAÇÃO HIDROELÉTRICA NO BRASIL

A bacia do rio Amazonas tem um potencial hidrelétrico de 106 GW, que, se aproveitado, geraria maior parte de sua energia durante o período úmido com barragens a fio d'água. Isto é equivalente a 60% da capacidade hidrelétrica brasileira (EPE e MME, 2013). No entanto, se este potencial for explorado, haverá um enorme desequilíbrio na geração de energia hidrelétrica no Brasil, na qual mais da metade da energia será gerada no período úmido.

No entanto, o Governo Brasileiro (MME) e agências do setor de energia (EPE, ANEEL e Eletrobrás) não estão planejando aumentar a capacidade de armazenamento energético do Brasil (EPE e MME, 2013). Foi destacado que usinas hidrelétricas com reservatórios de armazenamento não são apropriados para a bacia amazônica. Além das razões mencionadas em Soito e Freitas (2011) e IPCC (2011), o fato da região ter uma geologia muito plana impede a construção de reservatórios de armazenamento. Uma enorme área inundada irá resultar em uma baixa capacidade de armazenamento. Outro fato importante, que não é mencionado na literatura, é que a variação de 5 metros de profundidade em um reservatório resultaria em uma enorme área devastada. Quando o nível do reservatório for reduzido durante o período seco, uma extensa área de floresta devastada aparecerá. Esta área devastada entre o reservatório e a floresta impactaria profundamente na fauna e na flora da região. Por exemplo, as comunidades indígenas e animais silvestres teriam que se deslocar cerca de 1 a 5 km para beber água do rio ou pescar durante o período seco.

A geologia do Sul, Sudeste, Centro-Oeste e em algumas áreas do Nordeste do Brasil são apropriadas para a criação de usinas hidrelétricas com reservatórios

variáveis por terem rios com a formação geológica de vale. Esta formação reduz consideravelmente a área alagada variável entre o reservatório cheio e vazio, reduzindo o impacto ambiental e social dos reservatórios de armazenamento.

Este artigo propõe que novos reservatórios de armazenamento deveriam ser construídos nas bacias hidrográficas dessas regiões. Com isso, a geração de energia hidrelétrica reduziria durante o período úmido, mas aumentaria durante o período seco. Este conceito vai de encontro à abordagem usual de minimizar o custo da eletricidade em bacias hidrográficas. Mas como há a necessidade de aumentar o armazenamento de energia, há necessidade de mais investimentos nestas bacias.

Em suma, uma boa estratégia para utilizar eficientemente o potencial hidrelétrico brasileiro é gerar eletricidade durante o período úmido na bacia Amazônica e aumentar a capacidade de armazenamento das outras bacias para que elas gerem a maior parte de sua eletricidade durante o período seco.

4. ENHANCED-PUMPED-STORAGE

Centrais hidrelétricas reversíveis (CHR) são amplamente utilizadas para armazenar energia. A 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. 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 CHRs.

A combinação de uma CHR de larga escala e uma série de barragens em cascata, como proposta neste trabalho, foi chamada de *Enhanced-Pumped-Storage (EPS)*. Esta técnica não só melhora a operação das barragens em cascata, mas também pode aumentar consideravelmente a capacidade de armazenamento de energia do Brasil.

Uma CHR com um grande reservatório de armazenamento, construído perto de um reservatório próximo da cabeceira de um rio, pode alterar o fluxo sazonal do rio e, assim, mudar a geração hidrelétrica deste. Esquemas de *Enhanced-Pumped-Storage* armazenam energia em forma de água durante o período úmido e geram eletricidade durante o período seco. Além de usar o excesso de energia gerada na Amazônia por barragens a fio d'água durante o período chuvoso para bombear água em CHRs em outras regiões, esquemas de EPS podem ser usados para armazenar o excedente de geração proveniente de fontes renováveis intermitentes, como a eólica e solar.

Os esquemas de EPS consistem na criação de um novo reservatório artificial, com 200 metros (ou mais) a mais que o reservatório inferior, localizado perto do topo de uma série de hidroelétricas em cascata. Além disso, a distância entre os dois reservatórios deve ser menor do que 12 km e o reservatório superior deve ter uma formação geológica impermeável e estável. Quanto maior a diferença de altura entre os dois reservatórios, mais finos os tubos 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 menor a evaporação. O reservatório inferior deve ter uma maior capacidade de armazenamento de água do que o reservatório superior de modo que as bombas possam operar à capacidade máxima durante todo o período úmido.

Exemplos de EPS podem ser implementados na Bacia do Paraná como mostra a Figura 4. Durante o período chuvoso, parte da água na barragem do reservatório inferior (Serra do Facão e Furnas) seria bombeada para o reservatório superior da CHR (Catalão e Canastra) usando a eletricidade excedente das barragens na região Amazônica. Isto reduziria a geração do reservatório inferior e as barragens em cascata no rio (Grande, Paranaíba e Paraná). Durante o período seco, a água armazenada no reservatório superior geraria eletricidade na CHR e nas barragens em cascata.

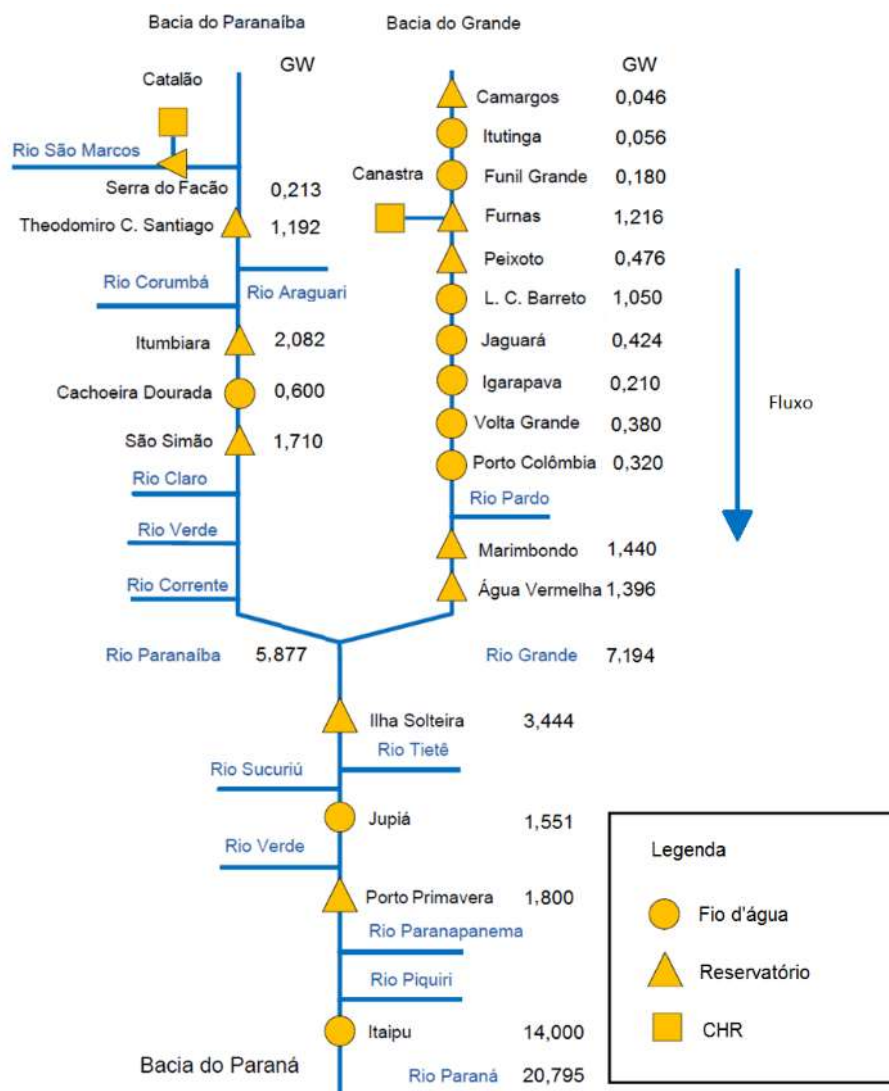


Figura 4 – Diagrama das barragens nos rios Paraná, Paranaíba e Grande com dois esquemas *Enhanced-Pumped-Storage* propostos.

A CHR Canastra consiste de um reservatório superior artificial na Serra da Canastra, que pode variar de 1.050 metros para 1.120 ou 1.250 metros de altura e de um reservatório inferior, reservatório de Furnas, a 760 metros acima do nível do mar. Durante o período úmido, o reservatório encheria seguindo as Figuras 5(a) e 5(b). Durante o período seco, o reservatório esvaziaria seguindo as Figuras 5(b) e 5(a). Os cálculos para estimar a capacidade de armazenamento foram feitos com a diferença de volume entre as topologias do reservatório.

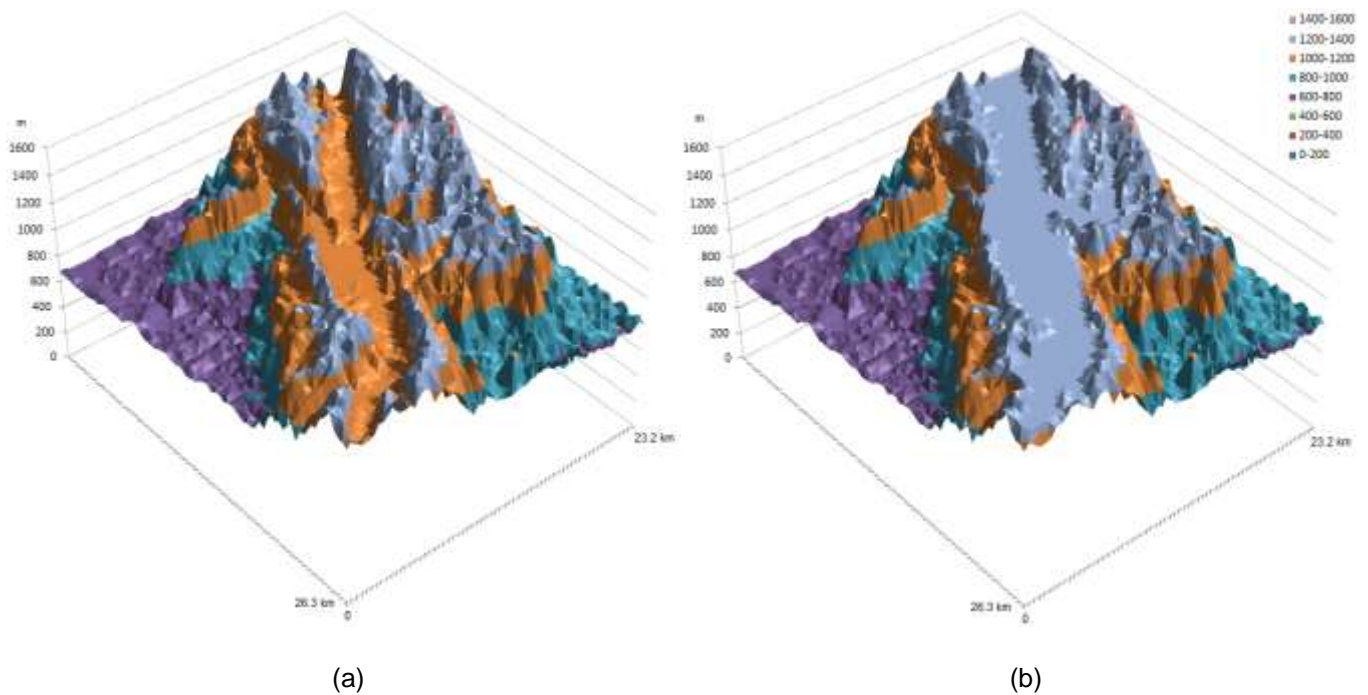


Figura 5 –Reservatório Canastra, (a) vazio a 1,070 metros e (b) cheio a 1,250 metros

Assumindo que as eficiências das barragens em cascata não são afetadas, a perda de energia no esquema Canastra EPS é igual a bombear água a partir do reservatório Canastra para o reservatório de Furnas Canastra e gerar eletricidade da Canastra a Furnas. Estima-se que este processo tenha uma eficiência de 75%. No entanto, a energia total gerada no esquema Canastra EPS será gerada a partir do reservatório de Canastra (1,120 metros) até a Usina de Itaipu (100 metros). Portanto, o rendimento global de sistemas de EPS pode ser superior a 90%, tal como demonstrado nas equações abaixo.

$$\text{Eficiência Global} = \frac{\text{Altura da EPS} - \text{Altura da CHR} \times (1 - \text{Eficiência da CHR})}{\text{Altura da EPS}}$$

$$\text{Eficiência Global} = \frac{1,020 - 352 \times 0,25}{1,020} \times 100 = 91,3\%$$

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apontou problemas no armazenamento energético brasileiro. Primeiro, mostrou a necessidade de aumentar a capacidade de armazenamento energético do Brasil, se o país ainda pretende gerar 80% de sua energia a partir de hidrelétricas. Em seguida, sugere que esta capacidade de armazenamento energético deve ser construída nas regiões Sul, Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste, de modo que a maior parte de sua energia seja gerada durante o período seco para complementar a geração na região Amazônica durante o período úmido. Além disso, argumenta que,

para aumentar a segurança energética do país, os futuros reservatórios de armazenamento devem ser distribuídos na regiões Sul, Centro-Oeste e Nordeste, já que a Região Sudeste tem cerca de 70% da capacidade de armazenamento brasileira.

O artigo apresentou a técnica *Enhanced-Pumped-Storage*, que é a combinação de uma CHR de grande escala com hidrelétricas em cascata. EPS necessita de uma área consideravelmente menor para armazenar a mesma quantidade de energia e reduz as perdas por evaporação. Além disso, pode ter uma eficiência de armazenamento total de 90%, ser usada para armazenar energia proveniente de fontes intermitentes e aumentaria consideravelmente a capacidade de armazenamento energético do Brasil. Porém, é importante notar que o custo de EPS é comparável ao custo de barragens convencionais e esquemas de EPS não geram energia, apenas a armazenam.

6. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a CAPES/BRASIL por financiar esta pesquisa de pós-doutorado com uma bolsa de Atração de Jovens Talentos, Ciência sem Fronteiras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEBDS, “*Recommendations for Brazil’s Electrical Energy Policy*”, Rio de Janeiro: Brazilian Business Council for Sustainable Development, 2013.

DA SILVA, N., ROSA, L., ARAÚJO, M., “*The utilization of wind energy in the Brazilian electric sector's expansion*”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9 (3), p. 289-309, 2005.

EPE, MME, “*Plano Decenal de Expansão de Energia – 2022*”, Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2013.

FARIELLO, D., “*Governo admite pela primeira vez risco de apagão, ainda que baixíssimo*”, <http://oglobo.globo.com/economia/governo-admite-pela-primeira-vez-risco-de-apagao-ainda-que-baixissimo-1-11596110>, 2014.

GODOI, M., “*País sofre com a falta de novas hidrelétricas com reservatórios*”, Rio de Janeiro: Agência Canal Energia, 2013.

IPCC, “*Chapter 5 - Hydropower. In: Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*”. Cambridge: Cambridge University Press, p. 50, 2011.

MARANHÃO, A. *“País precisa reduzir o consumo de eletricidade”*. Rio de Janeiro: O Globo, 2014.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, <http://www.ons.org.br>, 2014.

RICOSTI, J. AND SAUER, I., *“An assessment of wind power prospects in the Brazilian hydrothermal system”*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 19, p. 742-753, 2013.

SOITO, J. L. AND FREITAS, M. A., *“Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change”*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (6), p. 3165-3177, 2011.