

Usinas Hidrelétricas Reversíveis Sazonais no Rio São Francisco: aumentando o armazenamento energético e diminuindo a evaporação

*Seasonally -Pumped-Storage on the São Francisco River:
increasing energy storage capacity and reducing
evaporation losses*

Julian David Hunt^a

Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas^b

Amaro Olímpio Pereira Júnior^c

^aPos-Doutorando em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
End. Eletrônico: julian.hunt@ppe.ufrj.br

^bProfessor do PPE/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
End. Eletrônico: mfreitas@ppe.ufrj.br

^cProfessor Adjunto do Programa de Planejamento Energético da COPPE, UFRJ,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
End. Eletrônico: amaro@ppe.ufrj.br

doi:10.18472/SustDeb.v7n3.2016.17436

Recebido em 22.06.2016

Aceito em 05.12.2016

ARTIGO - VARIA

RESUMO

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco tem grande importância para o país não apenas pelo volume de água transportado em uma região semiárida, mas também pelo potencial hídrico passível de aproveitamento energético e abastecimento hídrico da região Nordeste. Um desafio na gestão de seus recursos hídricos é a perda de água por evaporação no Reservatório de Sobradinho. Este artigo propõe a aplicação de um novo esquema de armazenamento energético o qual combina Usinas Hidrelétricas Reversíveis Sazonais (UHRS) com hidrelétricas em cascata, com o intuito de aumentar a capacidade de armazenamento hídrico e energético do Brasil e diminuir a evaporação no Reservatório de Sobradinho. A proposta UHRS de Muquém tem potencial de aumentar a capacidade de armazenamento energético do Sistema Interligado Nacional (SIN) em 4,8%, gerar eletricidade durante o horário de ponta e armazenar a geração elétrica das fontes eólica e solar.

Palavras-chave: Perdas por Evaporação. Impacto Ambiental. Recursos Hídricos. Armazenamento Energético.

ABSTRACT

The San Francisco river basin is very important for the country not only because of the volume of water that it transports through the Brazilian semi-arid region, but also on account of the potential for power generation and regional water supply. A challenge for the management of its water resources is the loss of water by evaporation in the Sobradinho reservoir. This article proposes the establishment of a new energy storage scheme that combines the operation of seasonal pumped-storage plants (SPS) with hydroelectric dams that operate in cascade, in order to increase the water and energy storage capacities and reduce evaporation in the Sobradinho reservoir. The proposed Muquém SPS has the potential to increase the national energy storage capacity by 4.8%, generate electricity during peak hours and store energy from wind and solar sources.

Keywords: Losses from Evaporation. Environmental Impact. Water Resources. Energy Storage.

1 INTRODUÇÃO

Em 1973, a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) começou a construção da Hidrelétrica de Sobradinho. O lago, que foi formado em 1979, tem uma superfície máxima de 4.214 km² e é um dos maiores do mundo e serve como reservatório de regularização plurianual de vazão da parte Norte do Rio São Francisco. A construção do Reservatório de Sobradinho foi feita em uma época com baixa demanda por água para atividades econômicas e agrícolas. O reservatório, com alta evaporação, era interessante para aumentar a umidade da região, que é a mais seca do Brasil (PEREIRA; PRUSKI; SILVA; RAMOS, 2009).

Com a expansão da agricultura para o Nordeste nos últimos anos, a importância da água aumentou (VALDES *et al.*, 2004; NYS, 2015). Nesse novo cenário, o desperdício de água é assunto constantemente debatido. O uso da água para a geração elétrica resulta em menores benefícios econômicos do que para outros serviços, como abastecimento de água para agricultura e outras atividades econômicas. Dessa forma, o abastecimento hídrico tem preferência à geração elétrica (ANEEL; ANA; OMM, 2001).

Em meio a uma crise hídrica, há falta de água em todos os setores, como agricultura, indústria, consumo humano, etc. Portanto, reservatórios de alta evaporação não são bem vistos no atual cenário do país, pelo contrário, precisa-se de reservatórios com baixa evaporação devido ao aumento da demanda de água na Bacia do São Francisco (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, 2015).

O principal motivo da construção da Usina de Sobradinho era controlar o fluxo do rio para regularizar a geração nas usinas de Sobradinho (potência instalada de 1.140 MW), Itaparica (1.479,6 MW), Paulo Afonso (4.279,6 MW), Moxotó (400 MW) e Xingó (3.162 MW) (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2015). Hoje em dia, além de regular a geração hidrelétrica, o reservatório mantém o fluxo do rio para viabilizar outras atividades econômicas como a agricultura irrigada.

Com a construção da barragem, a maior parte da população ribeirinha foi deslocada compulsoriamente pelo Estado e reassentada a vários quilômetros das margens originais do rio, em plena Caatinga, em solos impróprios para o plantio. Com a formação do lago desapareceram as melhores terras para a agricultura nas condições sociais de produção até então vigentes. Porém, a construção da usina de Sobradinho foi muito importante na época, já que usinas hidrelétricas geram desenvolvimento econômico para a região e também empregos. Além disso, representam uma forma de energia limpa, barata e são capazes de diminuir os impactos de enchentes e secas.

O sistema apresentado neste artigo visa armazenar parte da água do Reservatório de Sobradinho (28,7 km³) em um reservatório com capacidade de 7,8 km³, chamado Reservatório de Muquém. Esse reservatório possui uma área 81 vezes menor que a do Reservatório de Sobradinho devido à maior profundidade. Enquanto Sobradinho apresenta cerca de 12 metros de variação da cota do reservatório, o novo Reservatório de Muquém tem uma variação de 150 metros entre as cotas máxima e mínima.

Com a construção de novas usinas hidrelétricas na Amazônia sem armazenamento, projetos que aumentem a capacidade de armazenamento energético do Brasil estão ganhando importância (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2015). Este artigo sugere a combinação da operação de UHRS com usinas hidrelétricas em cascata (HUNT; FREITAS; PEREIRA JÚNIOR, 2014) a fim de aumentar o potencial de armazenamento energético e viabilizar o desenvolvimento do potencial hidrelétrico da Bacia do Amazonas. As usinas da Amazônia geram a maior parte de sua energia durante o período úmido. Parte dessa energia seria armazenada em reservatórios em outras bacias, já que a Amazônia é plana e não permite a construção de hidrelétricas com reservatórios de acúmulo. A geologia das regiões Sul, Sudeste e Nordeste tem a formação de vale e planaltos, o que resulta em reservatórios com alta profundidade. Dessa forma, a água armazenada nessas outras bacias pode ser usada durante o período seco para gerar energia, reduzindo assim a área alagada e a evaporação.

1.1 ESTIAGEM DO RIO SÃO FRANCISCO E SOLUÇÕES

O Rio São Francisco está passando pela pior estiagem desde a criação dos reservatórios de acúmulo de Sobradinho e Três Marias. O nível de armazenamento hídrico da bacia está menor do que 5% do armazenamento total (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2016), de acordo com a Figura 1. A Agência Nacional de Águas permitiu a redução da vazão do Rio São Francisco para 800 m³/s com a intenção de preservar os recursos hídricos da bacia (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016). É importante notar que com o El Niño, a disponibilidade hídrica no Nordeste diminuirá durante 2016, agravando ainda mais a crise hídrica na região (CLIMA TEMPO, 2016).



Figura 1 – Histórico de armazenamento de água na Bacia do São Francisco.

Fonte: ONS 2015

A obra de transposição de água do Rio São Francisco para os estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará está prevista para terminar em 2017. Isso aumentará a demanda por água do Rio São Francisco. A vazão mínima dessa transposição será de 26,4 m³/s de água, que comprometerá 833 hm³ por ano. A vazão máxima atingirá 127 m³/s, o que comprometerá mais 4,005 hm³ por ano, 8,4% da capacidade de armazenamento total da Bacia do Rio São Francisco.

Este artigo propõe três soluções para a crise hídrica na Bacia do Rio São Francisco:

1. Diminuição da água utilizada para geração de eletricidade em Sobradinho;
2. Reduzir a cota do Reservatório de Sobradinho para 381 m (ou seja, a menor possível), com o intuito de reduzir a evaporação de água no Reservatório de Sobradinho. A vazão do Rio São Francisco seria então controlada com o Reservatório de Três Marias, que tem um grande potencial de armazenamento hídrico com uma menor área alagada;
3. Construção de usinas hidrelétricas reversíveis sazonais no Rio São Francisco.

A Figura 2 mostra que a evaporação no Reservatório de Três Marias é consideravelmente menor que a evaporação no Reservatório de Sobradinho. Dessa forma, o Reservatório de Três Marias deve ser priorizado para armazenar água e energia para o Rio São Francisco. O Reservatório de Sobradinho deve, sempre que possível, operar próximo de sua cota mínima com o intuito de diminuir o espelho-d'água em 3,7 vezes, quando comparado com a sua cota máxima (Tabela 1).

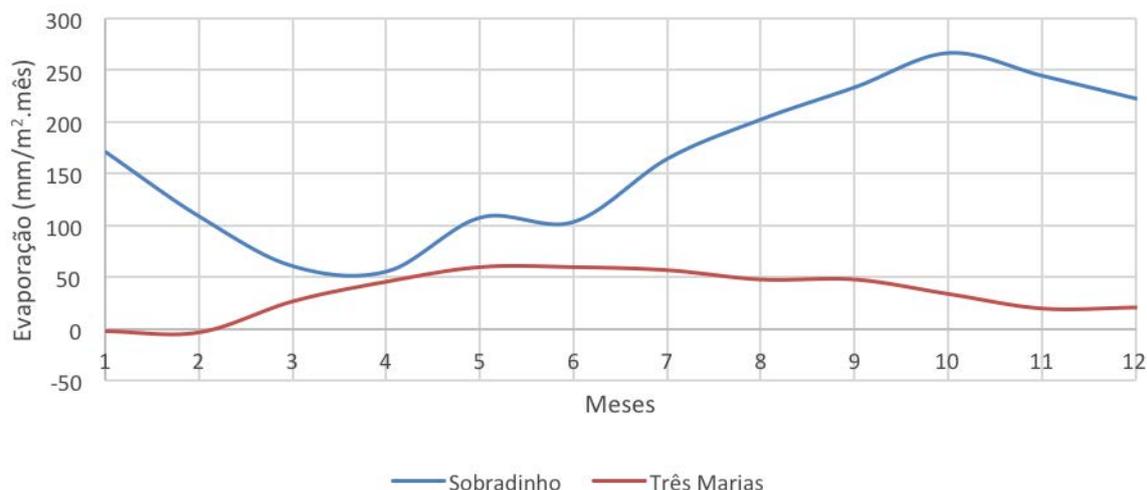


Figura 2 – Evaporação por área nos reservatórios de Sobradinho e Três Marias assumindo os reservatórios cheios.

Fonte: ONS 2015

Tabela 1 – Características dos reservatórios de Sobradinho e Três Marias (cota máxima e mínima).

Usina	Área Alagada (m ³)	Evaporação* (m ³ /s)	Perdas Energéticas** (GWmed)	Volume (hm ³)
Sobradinho (Cota 392,5 m)	4.196	262,1	0,754	34.116
Sobradinho (Cota 380,5 m)	1.145	72,3	0,201	5.447
Três Marias (Cota 572,5 m)	1.064	14,8	0,049	19.528
Três Marias (Cota 549,2 m)	368,6	5,1	0,016	4.250

* A evaporação total foi calculada assumindo reservatório cheio ou vazio o ano inteiro.

** As perdas energéticas só levam em conta a água evaporada nos reservatórios.

Fonte: ONS 2015

Outra alternativa para minimizar a evaporação no Reservatório de Sobradinho é criar novos reservatórios de acumulação a montante de Sobradinho para manter o reservatório operando com a sua cota mínima, assim, reduzindo a evaporação.

2 METODOLOGIA: USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS SAZONAIS

Usinas hidrelétricas reversíveis (UHR) são amplamente utilizadas para armazenar energia no mundo (VENNEMANN; GRUBER; HAAHEIM; KUNSCH, 2011). 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. 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.

Uma bacia hidrográfica com hidrelétricas em cascata funciona da forma representada na Figura 3 (a) onde a seta azul representa o fluxo de água que passa pelas hidrelétricas gerando eletricidade. As usinas com reservatório têm o potencial de armazenar água e energia, alterando o fluxo normal do rio; as usinas a fio de 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.

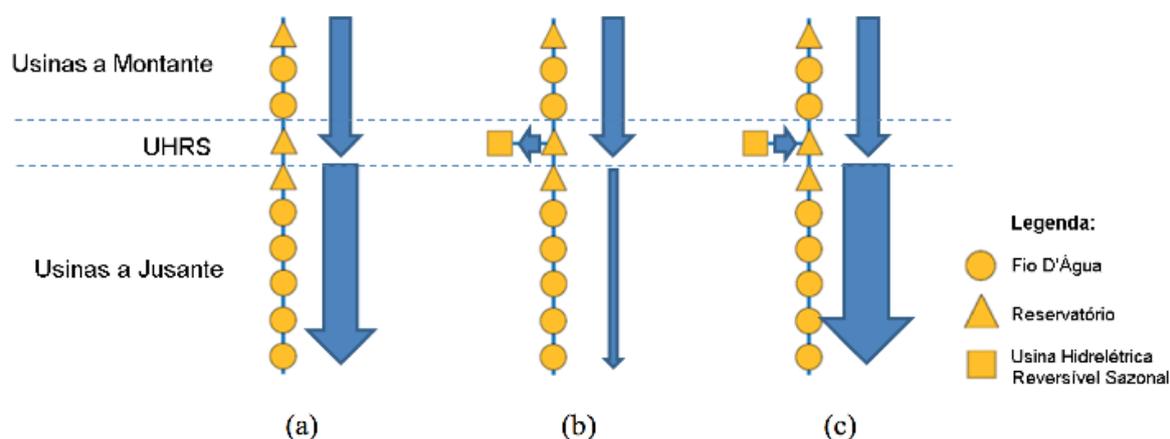


Figura 3 – Operação de (a) usinas hidrelétricas convencionais (b) UHRs durante períodos de alta disponibilidade hídrica (c) UHRs durante períodos de baixa disponibilidade hídrica.

Fonte: HUNT; FREITAS; PEREIRA, 2014

Com a combinação de uma Usina Hidrelétrica Reversível Sazonal e hidrelétricas em cascata, Figura 3 (b) e (c), é possível alterar o fluxo de uma bacia hidrográfica de acordo com a necessidade de armazenamento energético e geração elétrica (HUNT; FREITAS; PEREIRA JÚNIOR, 2014). A Figura 3 (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 3 (c).

A Tabela 2 mostra de forma resumida as características operacionais das diferentes alternativas apresentadas na Figura 3.

Tabela 2 – Comparação entre as diferentes formas de operação das hidrelétricas em cascata.

	Alta Disponibilidade Hídrica na bacia e/ou Alta Disponibilidade de Energia no SIN		Baixa Disponibilidade Hídrica na bacia e/ou Baixa Disponibilidade de Energia no SIN	
	<u>Convencional</u>	<u>UHRS</u>	<u>Convencional</u>	<u>UHRS</u>
Vazão nas UHE a Jusante	Alta	Baixa (Com o intuito de conservar a energia do sistema)	Baixa	Alta (Com o intuito de gerar eletricidade em momentos de necessidade)
Vertimento nas UHE a Jusante	Alto	Baixo (Armazenamento da água que seria vertida)	Baixo	Baixo
Perda com Bombeamento	Zero	25% do Bombeamento (As perdas ocorrem quando há excesso de energia no sistema)	Zero	Zero
Variação da queda nas UHE a Jusante	Baixa	Baixa	Alto (Queda das UHE a jusante diminui com o deplecionamento dos reservatórios)	Baixa

Fonte: HUNT; FREITAS; PEREIRA, 2016.

A eficiência total de armazenamento da UHRS em combinação com as hidrelétricas em cascata pode ser estimada com as equações abaixo. A Equação 1 apresenta uma explicação para o cálculo da eficiência do sistema de armazenamento e a Equação 2 apresenta mais detalhes sobre como estimar a eficiência do sistema. Os ganhos energéticos com a redução do vertimento e evaporação nas hidrelétricas em cascata a jusante da UHRS são incluídos nas equações, diferentemente das equações apresentadas no artigo HUNT; FREITAS; PEREIRA JÚNIOR, 2014.

Equação 1:

$$Eficiência = \frac{Energia\ Armazenada - Perda\ com\ Armazenamento + Perda\ com\ Vertimento + Perda\ com\ Evaporação}{Energia\ Armazenada}$$

Equação 2:

$$Eficiência\ do\ Sistema = \frac{(H_{UHRS} + H_{jUHRS} - 0,25 \times H_{UHRS}) \times F \times g + V + E}{(H_{UHRS} + H_j) \times F \times g}$$

Onde:

F = Vazão de água bombeada para a UHRS (em m³/s).

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

H_{jUHRS} = Altura da queda das hidrelétricas a jusante à 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/s²).

Note que H_{jUHRS} –é maior que H_j. Como a UHRS aumenta o potencial de armazenamento energético da bacia, as usinas hidrelétricas com reservatório não precisarão ser utilizadas com a mesma intensidade.

Assim, as usinas de regulação operarão próximo de sua capacidade máxima aumentando a queda das hidrelétricas em cascata a jusante à UHRS.

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 120% ou mais. Ou seja, uma UHRS pode aumentar a geração hidrelétrica total de uma bacia hidrográfica.

UHRSs consistem na criação de um novo reservatório artificial, com 100 metros (ou mais) a mais que o 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, mais finas as tubulações serão para gerar a mesma quantidade de energia e menor será a área alagada para o armazenamento energético. Quanto maior a variação da altura no reservatório superior, menor será a área alagada e a evaporação. O reservatório inferior ou o fluxo do rio devem ter água suficiente de modo que as bombas possam operar à capacidade máxima durante o período úmido, mantendo as restrições mínimas de vazão do rio.

3 RESULTADO: UHRS DE MUQUÉM NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Uma opção para a construção de uma UHRS na Bacia do Rio São Francisco é no município de Muquém (Figura 4). A região tem uma formação geológica com potencial de tornar-se um reservatório de alta profundidade e altitude com uma barragem de 230 metros e 2 km. A conexão do Reservatório de Muquém e o Rio São Francisco é feita por um canal de 1 km e uma tubulação de 9 km. A construção do canal e tubulação disponibiliza matéria-prima para a construção da Barragem de Muquém, reduzindo assim os custos de construção.

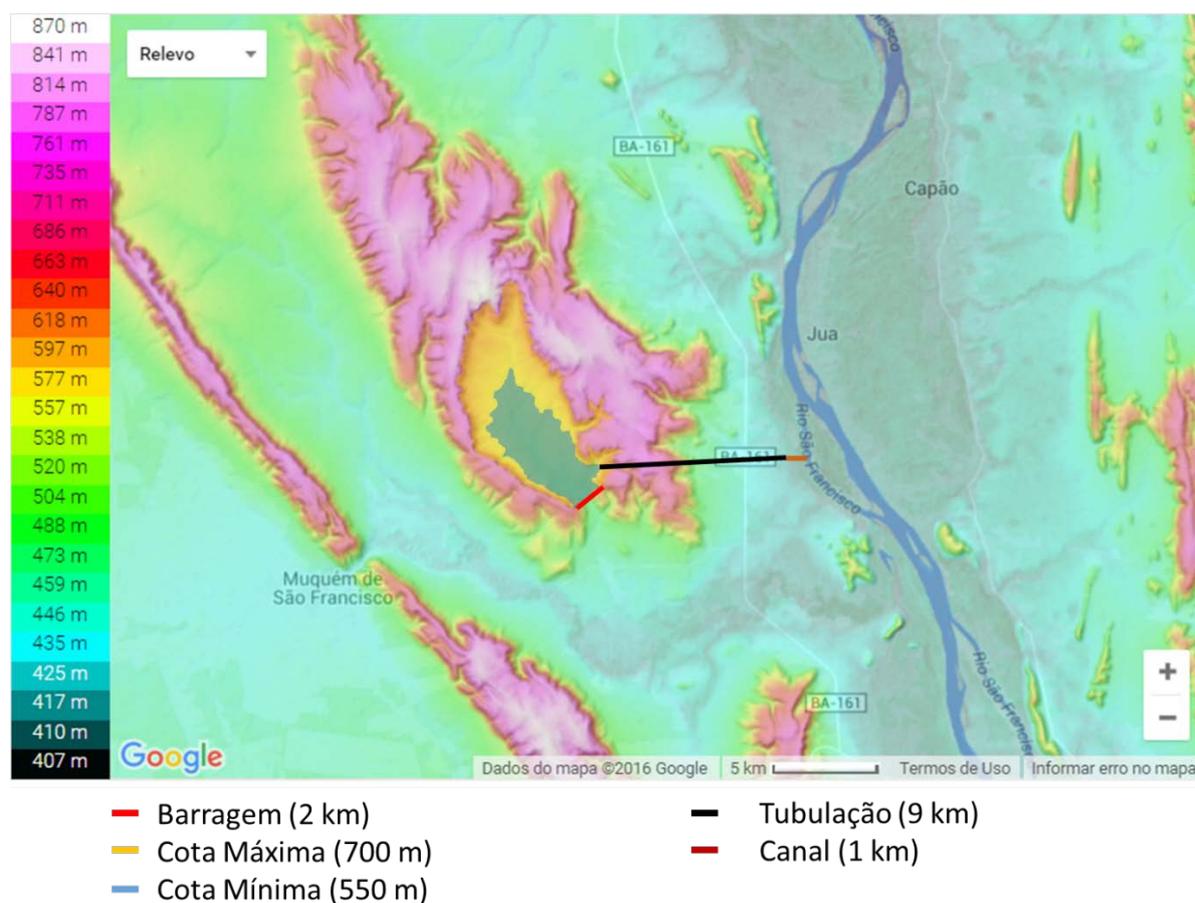


Figura 4 – Esquema da UHRS de Muquém, novo reservatório e conexão com o Rio São Francisco.

Fonte: Trabalho dos autores.

A cota da UHRS de Muquém varia 150 metros (550 – 700 m) e tem o volume útil de 7,8 km³, enquanto o volume útil do Reservatório de Sobradinho é de 28,7 km³. A área alagada do Reservatório de Muquém é de 52 km², enquanto o Reservatório de Sobradinho tem área de 4.214 km². Além disso, a UHRS de Muquém armazena por volta de 13,9 MWmed (4,8% do SIN) e Sobradinho 30,2 MWmed. Quanto maior a altitude do reservatório, menor a pressão atmosférica e menor a temperatura, isso condiciona uma menor evaporação.

A Figura 5 apresenta as hidrelétricas em cascata no Rio São Francisco depois da construção da UHRS de Muquém. Durante o período úmido ou durante períodos com alta disponibilidade hídrica, a água do Rio São Francisco seria bombeada para o Reservatório de Muquém. Durante o período seco ou durante períodos com baixa disponibilidade hídrica, a eletricidade seria gerada na UHRS de Muquém e nas hidrelétricas em cascata a jusante.

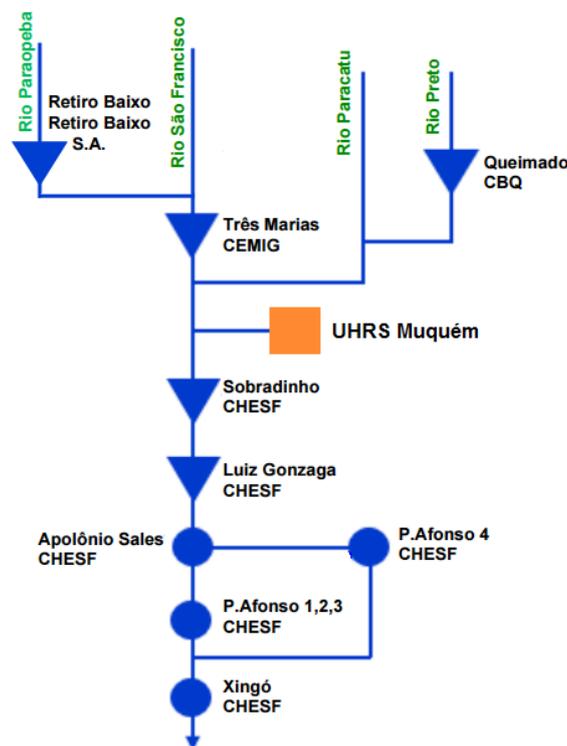


Figura 5 – Hidrelétricas em cascata do Rio São Francisco (a) antes e (b) depois da construção do Reservatório de Muquém (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2015).

Fonte: Trabalho dos autores

Note que o Reservatório de Sobradinho tem um grande papel em regular a vazão da parte baixa do Rio São Francisco. Essa regulação é importante tanto para a geração elétrica quanto para o abastecimento. Para reduzir por completo a variação do Reservatório de Sobradinho, seriam necessários outros projetos de UHRS, já que a UHRS de Muquém armazena apenas um terço do volume do Reservatório de Sobradinho.

4 DISCUSSÃO: ASPECTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DA UHRS DE MUQUÉM

4.1 DIMINUINDO A EVAPORAÇÃO DE SOBRADINHO

O Reservatório de Sobradinho possui a maior taxa de evaporação dos reservatórios brasileiros. A Figura 6 apresenta as taxas de evaporações mensais de reservatórios importantes no Brasil. A média anual de evaporação do Reservatório de Sobradinho é 168 mm, enquanto Furnas apresenta 33 mm, Bento

Munhoz com evaporação de 25,5 mm e a Serra da Mesa apresenta uma evaporação de 48,5 mm. Essas evaporações médias anuais demonstram o quão alta é a evaporação de Sobradinho, cerca de cinco vezes maior que os outros reservatórios apresentados. Assumindo a área de 4,214 km² para o Reservatório de Sobradinho durante todo o ano, a perda média anual de água do Rio São Francisco é de 167 m³/s.

Além da diminuição da evaporação por meio da redução da área alagada, outros fatores influenciam a evaporação, a altitude por exemplo. Sobradinho se encontra a 385 metros e o novo reservatório a cerca de 550-700 metros. Essa altitude implica em uma pressão atmosférica menor e em uma menor temperatura, ajudando assim na diminuição da evaporação do reservatório. É esperado que a evaporação do Rio São Francisco diminua em duas vezes com esse novo esquema devido à redução da área alagada do reservatório para 1.145 km².

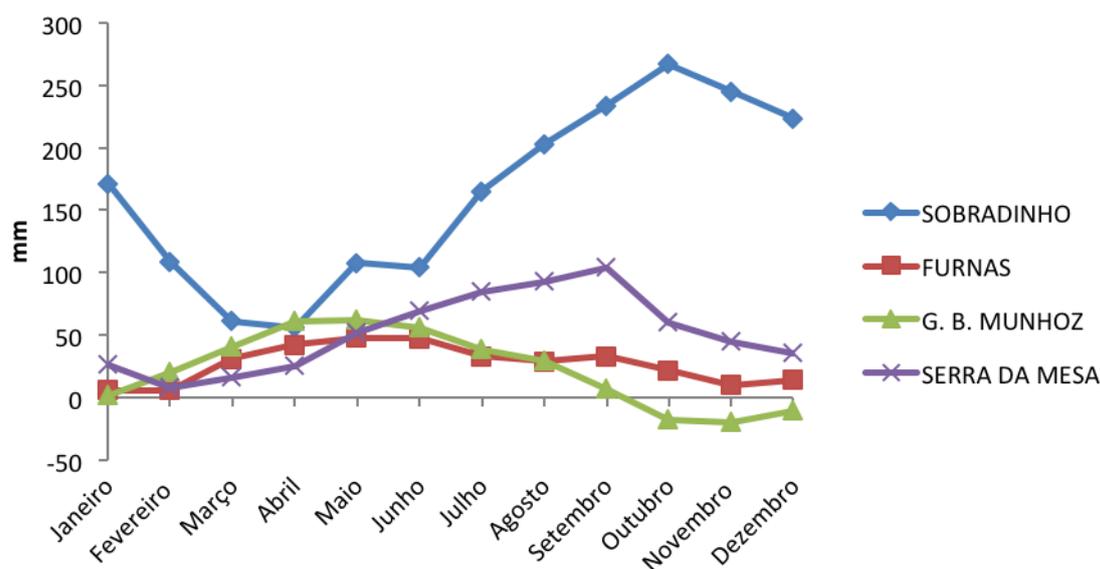


Figura 6 – Taxas de evaporações mensais de reservatórios importantes no Brasil (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2004).

Fonte: ONS, 2015

Caso o Reservatório de Sobradinho operasse na sua cota mínima, diminuindo a evaporação de água no reservatório, devido à menor evaporação, as UHRs aumentariam a geração elétrica do Rio São Francisco em 0,26 GWmed e teria uma perda de 0,18 GWmed com o bombeamento, totalizando um ganho sistêmico de 0,08 GWmed. O ganho hídrico seria por volta de 91,7 m³/s com a menor evaporação.

4.2 MENOR ÁREA ALAGADA

UHRs apresentam uma variabilidade de cota em seus reservatórios de 100 a 200 metros e são instalados na cabeceira de uma série de hidrelétricas em cascata. Por esses motivos, a área alagada de uma UHR é muito menor do que de reservatórios de armazenamento convencionais. Por exemplo, o Reservatório de Muquém, com 52 km², alagaria uma área 81 vezes menor do que o Reservatório de Sobradinho e armazenaria próximo da metade do potencial de armazenamento de Sobradinho. O que equivale a 4,8% do potencial de armazenamento do SIN.

4.3 DESCENTRALIZAÇÃO DO POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO ENERGÉTICO DO BRASIL

As principais usinas hidrelétricas com reservatório estão na região Sudeste. Se houver um volume limitado de chuva nessa 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.

Como choveu menos do que a média na região Sudeste durante 2012, 2013, 2014 e no início de 2015, o nível dos reservatórios está criticamente baixo, as usinas termelétricas estão operando em plena capacidade, o que contribuiu para um aumento de 50% no preço da eletricidade de janeiro de 2015 a janeiro de 2016 (GLOBO – G1, 2015).

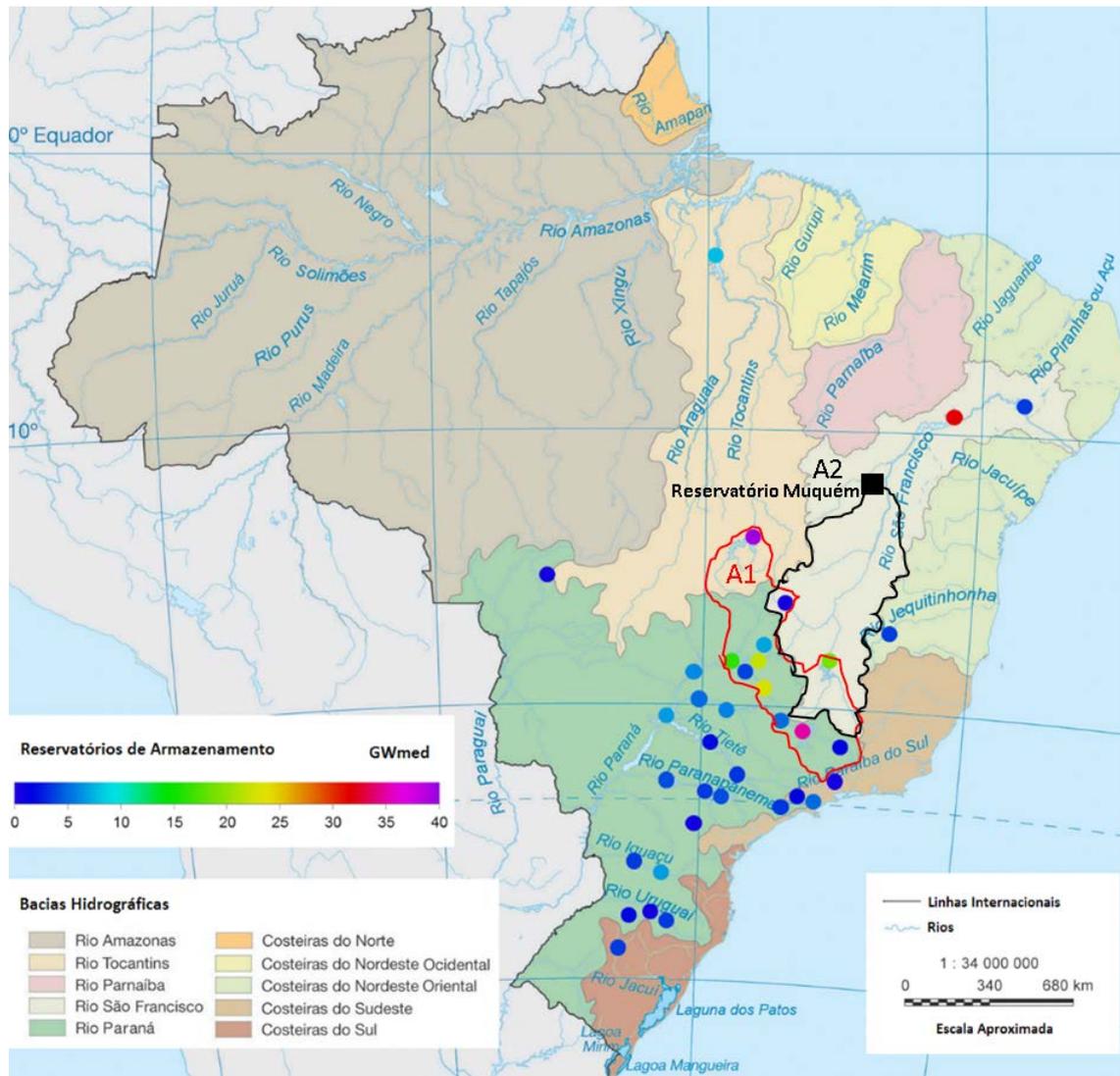


Figura 7 – Mapa com os reservatórios de acúmulo do SIN destacando em vermelho a área A1 e em preto a área A2.

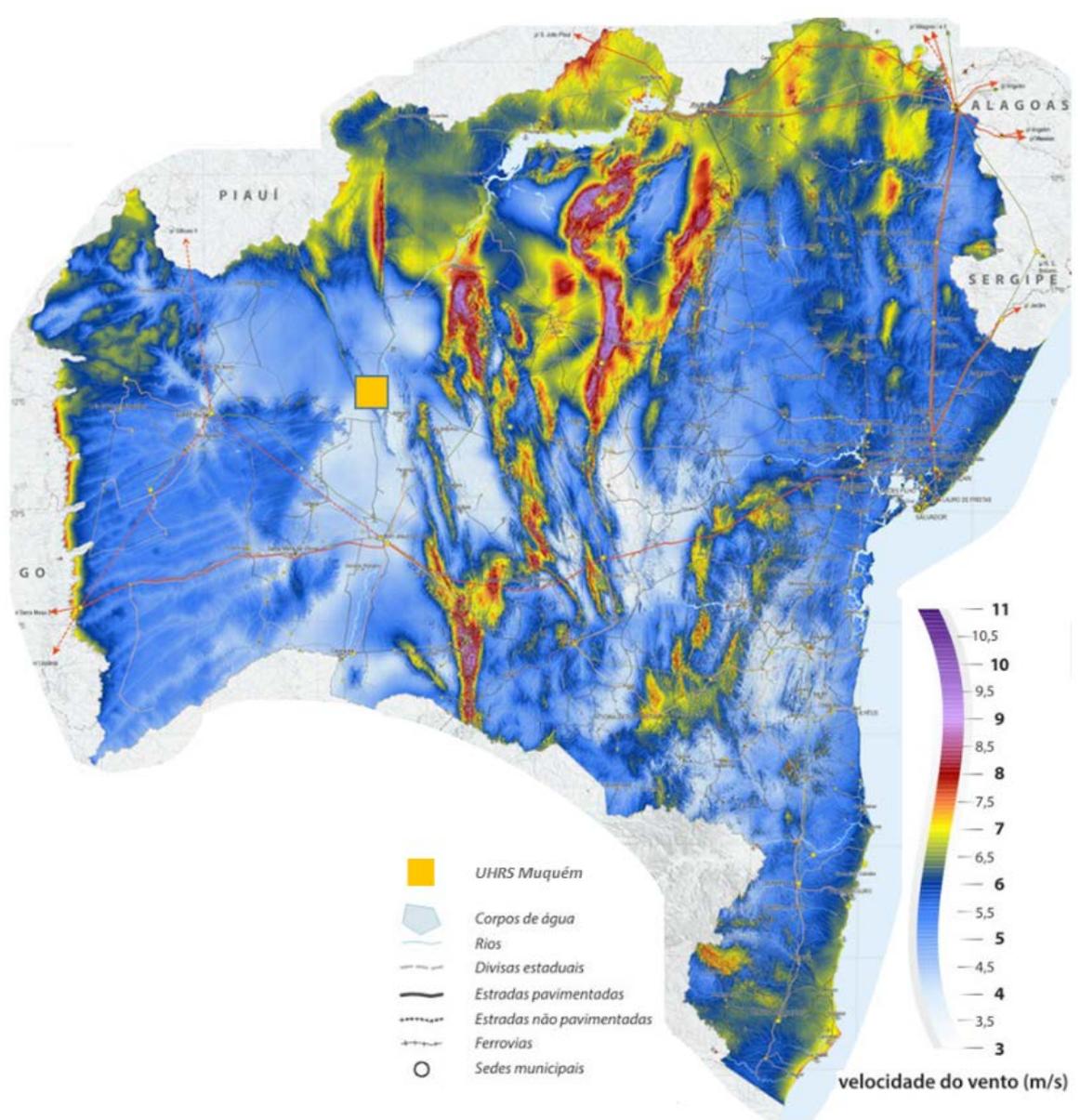
Fonte: Trabalho dos autores.

A Figura 7 mostra os reservatórios de armazenamento no Brasil, com suas respectivas capacidades de armazenamento. A área de captação pluvial demarcada em vermelho (A1) representa mais de 70% do potencial de armazenamento energético do Brasil. A região demarcada em preto (A2) capta água para armazenar na UHRS de Muquém, que aumentaria em 4,8% o potencial de armazenamento energético do SIN. Isso aumentaria a segurança energética do Brasil por descentralizar o potencial de armazenamento energético.

4.4 REMOVER A INTERMITÊNCIA DA GERAÇÃO ELÉTRICA DE FONTES RENOVÁVEIS

Uma UHRS tem a capacidade de remover a intermitência de fontes renováveis como eólica e solar com a mesma eficiência apresentada neste artigo (90%-120% de eficiência). Durante o período úmido, a UHRS consumirá mais eletricidade do SIN para bombear água quando tiver mais geração eólica e solar no SIN e bombeará menos quando tiver menos geração eólica e solar. Durante o período seco, a UHRS gerará mais eletricidade para o SIN quando tiver menos geração eólica e solar e gerará menos eletricidade quando tiver mais geração eólica e solar no sistema.

A UHRS de Muquém está localizada próximo das áreas com o maior potencial de geração eólica e solar do Brasil. Dessa forma, a UHRS de Muquém pode operar com o objetivo de armazenar a eletricidade gerada com os ventos com o intuito de diminuir os impactos da geração eólica e solar intermitente no SIN e otimizar as linhas de transmissão construídas para transmitir a geração eólica e solar. Nesse sentido, durante o período úmido, parte da geração eólica e solar será utilizada para bombear água para encher a UHRS de Muquém. Durante o período seco, a UHRS de Muquém gerará mais eletricidade quando a geração eólica e solar for menor. As Figuras 8 e 9 apresentam o potencial de geração elétrica com as fontes eólica e solar respectivamente.



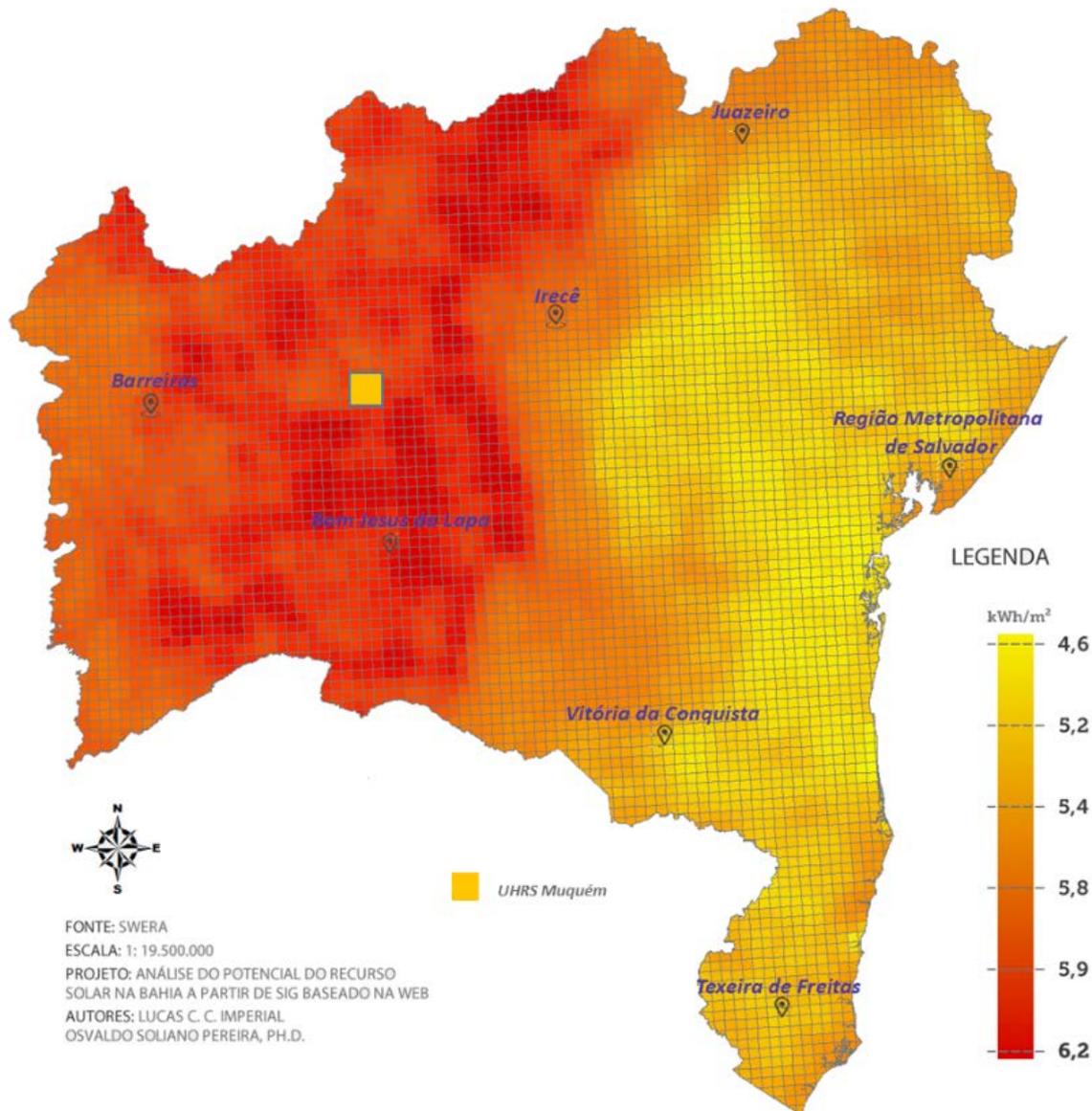


Figura 9 – Potencial de geração solar na Bahia e localização da UHRS de Muquém.

Fonte: IMPERIAL; PEREIRA, 2014

Além disso, a UHRS tem o potencial de reduzir a quantidade de harmônicos nas redes de transmissão, consumindo parte destes na rede com o bombeamento e gerando eletricidade posteriormente sem harmônicos.

4.5 AUMENTO DA AGRICULTURA IRRIGADA

Com a construção de UHRSs, o Reservatório de Sobradinho terá sua cota máxima diminuída consideravelmente. Essa área poderá ser utilizada em diversos setores, sendo um dos mais promissores em termos de benefícios econômicos o de agricultura irrigada. O desenvolvimento da agricultura irrigada resultará no aumento do excedente agrícola, da renda do agricultor, da quantidade de empregos na agricultura, nas suas atividades conexas, do fortalecimento dos núcleos urbanos e do parque agroindustrial. Além disso, resulta na reorientação de fluxos migratórios, dirigindo-os das zonas menos favoráveis para aquelas com maior vocação para irrigação podendo acarretar em facilitação de fixação do homem do campo mesmo que seja por via da agricultura familiar.

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE A USINA DE SOBRADINHO E UHRS DE MUQUÉM

A Tabela 3 apresenta as características dos Reservatórios de Sobradinho e Muquém.

Tabela 3 – Dados dos Reservatórios de Sobradinho e Muquém.

	Sobradinho	Muquém
Área Alagada (km ²)	4.214	52
Volume útil (km ³)	28,7	7,8
Armazenamento Energético (GWmed)	30,2	13,9
SIN (%)	10,7	4,8
Potência (GW)	1,05	1,3 ¹
Cota Máxima (m)	392,5	700
Cota Mínima (m)	380,5	550
Variação da Cota (m)	12	150
Evaporação Média Anual (mm/m ² mês)	168	<72,3 ⁴ +4 ² <76,3
Perda Vazão por Evaporação (m ³ /s) ³	269	4 ²
Perda por Evaporação (GWmed)	0,48	0,22

¹ Potência mínima para encher o Reservatório de Muquém durante 6 meses.

² A evaporação no Reservatório de Muquém não foi calculada. Mas com uma menor área alagada, menor pressão atmosférica e menores temperaturas (devido à maior altura) foi estimado que o Reservatório de Muquém apresenta uma evaporação menor que a do Reservatório de Sobradinho, proporcionalmente à diferença de área alagada.

³ Assumindo que o Reservatório de Sobradinho permaneça cheio o ano inteiro.

⁴ Evaporação do Reservatório de Sobradinho com sua cota mínima.

Fonte: Trabalho dos autores.

4.7 IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DA REDUÇÃO DA COTA DO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO

O Reservatório de Sobradinho tem uma grande variabilidade de área alagada devido à sua operação. A área alagada varia de 4,214 km² quando cheio para 1.145 km² quando vazio. A região intermediária, que é alagada durante o período úmido e seca durante o período seco, resulta em uma região desértica com solo rachado sem nenhuma utilidade que se estende aproximadamente 5 km entre o entorno do reservatório e o lago durante o período seco. Essa área desértica e degradada tem aproximadamente 3,000 km².

Durante o período seco, os animais que vivem no cerrado ao entorno do Reservatório de Sobradinho têm que percorrer 5 km pela região desértica para chegar ao reservatório para beber água. Esses animais ficam vulneráveis a predadores, por não poder contar com a cobertura de árvores para se proteger. Dessa forma, a grande variabilidade da área alagada do Reservatório de Sobradinho resulta um enorme impacto ao ecossistema ao redor do reservatório.

A redução da cota do reservatório traria benefícios para o meio ambiente por manter essa cota fixa e permitir que matas ciliares possam ser introduzidas ao entorno do reservatório, assim aprimorando de forma considerável a qualidade do meio ambiente da região.

Da mesma forma, a variação de área alagada tem um grande impacto para as comunidades que moram no entorno do Reservatório de Sobradinho que também necessitam percorrer 5 km em uma região desértica de solo rachado para chegar ao lago do reservatório. Com a fixação da cota do reservatório, as populações do entorno se beneficiariam com um lago de cota fixa para desenvolver atividades de pesca, entretenimento, plantação irrigada, etc.

4.8 IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DA UHRS DE MUQUÉM

Existem vários impactos socioambientais envolvendo a construção e operação da UHRS de Muquém. A lista abaixo mostra os principais impactos e possíveis mitigações.

a) Construção da Barragem e Tubulações da UHRS de Muquém.

A UHRS requer a construção de uma barragem de 230 metros de altura, 2 quilômetros de comprimento e tubulações de 9 km. Essa é uma extensa obra que requer a mobilização de grande número de pessoal. Para isso será necessário o desenvolvimento de uma infraestrutura básica no local para abrigar as pessoas que participarão da obra. Será também necessária a ampliação das vias de acesso ao empreendimento, entre outras atividades. Os impactos ambientais dessas atividades estão descritos em IPCC (2012).

b) Impacto da Área Alagada do Reservatório de Muquém

O Reservatório de Muquém consiste em uma área de 52 km² em uma região de Caatinga sem a intervenção do homem. Caso o projeto de UHRS de Muquém dê prosseguimento, um estudo de impacto ambiental detalhado da localização será necessário para estudar possíveis espécies de fauna e flora endêmicas na localização. Em uma análise preliminar com o Google Earth, não foi encontrada nenhuma intervenção humana na região, dessa forma os impactos sociais resultantes da área alagada não seriam relevantes.

c) Operação da UHRS de Muquém

A operação da UHRS de Muquém é diferenciada de usinas hidrelétricas convencionais, devido a sua alta variação de cota de 150 metros. É importante a criação de uma barreira ecológica para impedir a entrada de animais na região da UHRS visando diminuir o impacto da região no ecossistema ao redor. O animal que entrar nessa região poderá ter problemas em sair, já que é um local íngreme e anualmente alagado.

5 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou problemas com o armazenamento energético no Brasil e no planejamento de recursos hídricos da Bacia do Rio São Francisco. Apontou os principais problemas nos reservatórios de acúmulo convencionais brasileiros, sendo eles, a pequena variabilidade de sua cota, o que resulta em uma alta evaporação e área alagada. A demanda de água no Brasil está aumentando, principalmente para utilização em atividades como agricultura irrigada. O Reservatório de Sobradinho apresenta características de um reservatório construído em uma época diferente. Sua alta evaporação e grande área alagada traziam o benefício de aumentar a umidade da região, porém, agora a grande área alagada é considerada um desperdício de água, devido à alta evaporação, e de terra, devido à grande área alagada.

Nesse contexto, o artigo apresentou a tecnologia chamada Usina Hidrelétrica Reversível Sazonal em combinação com hidrelétricas em cascata. UHRSs necessitam de uma área consideravelmente menor para armazenar a mesma quantidade de energia e água, e reduz as perdas por evaporação.

Além disso, podem ter uma eficiência de armazenamento total de 90% a 120%, podem ser usadas para armazenar energia proveniente de fontes intermitentes, podem reduzir a evaporação de reservatórios convencionais, aumentar as atividades de agricultura irrigada na região e descentralizar o armazenamento energético do Brasil.

O Reservatório de Sobradinho tem um grande papel em regular a vazão da parte baixa do Rio São Francisco. Essa regulação é importante tanto para a geração elétrica quanto para o abastecimento hídrico. Para reduzir por completo a variação do Reservatório de Sobradinho, seriam necessários outros projetos de UHRS. Já que a UHRS de Muquém armazena apenas um terço do volume do Reservatório de Sobradinho.

A UHRS de Muquém proposta neste artigo tem sua cota variando entre 550 e 700 metros, volume útil de 7,8 km³, área alagada de 52 km² e armazena por volta de 13,9 MWmed (4,8% do SIN). UHRSs permitiriam que o Reservatório de Sobradinho operasse na sua cota mínima, diminuindo a evaporação de água no reservatório. Com a menor evaporação, UHRSs aumentariam a geração elétrica do Rio São Francisco em 0,26 GWmed e teria uma perda de 0,18 GWmed com o bombeamento, totalizando um ganho sistêmico de 0,08 GWmed. O ganho hídrico seria por volta de 91,7 m³/s com a menor evaporação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Acompanhamento da Bacia do Rio São Francisco**: 12/01/2016. Brasília, 2016.
- ANEEL, ANA e OMM. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília: ANEEL, 2001.
- CLIMA TEMPO. **El Niño mantém o Brasil aceso**, nov./2015. Disponível em: <<http://www.climatempo.com.br/noticia/2015/11/27/el-nino-mantem-o-brasil-aceso-1290>>. Acesso em: 13 jan. 2016.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **Informação Geral**. (CBHSF), 2015. Disponível em: <<http://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>>.
- CRESESB. Atlas do Potencial Eólico do Estado da Bahia. Rio de Janeiro: CEPEL, 2013. Empresa de Pesquisa Energética, 2015. **Plano Decenal de Energia**: 2024. Rio de Janeiro.
- GLOBO - G1. **Aneel propõe R\$ 18,4 bi em subsídios na tarifa de energia elétrica em 2016**, dez/2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2015/12/aneel-propoe-r-184-bi-em-subsidios-na-tarifa-de-energia-eletrica-em-2016.html>>. Acesso em: 13 jan. 2016.
- HUNT, J.; FREITAS, M.; PEREIRA JÚNIOR, A. **Aumentando a Capacidade de Armazenamento Energético do Brasil**. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. Florianópolis, 2014.
- _____. Enhanced-Pumped-Storage: combining pumped-storage in a yearly storage cycle with dams in cascade in Brazil. **Energy**, 78, p. 513-523, 2014.
- _____. A review of seasonal pumped-storage combined with dams in cascade in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 70, p. 385-398, 2017.
- IMPERIAL, L.; PEREIRA, O. **Análise do Potencial do Recurso Solar na Bahia**. Salvador: SWERA, 2014.
- IPCC. Chapter 5 Hydropower. **Special Report Renewable Energy Sources (SRREN)**. New York: Cambridge University Press, 2012.
- NYS, E. **Série Água Brasil**: convivência com o semiárido e gestão proativa da seca no Nordeste do Brasil. Brasília: World Bank, 2015.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Evaporação Líquida nas Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: ONS, 2004.
- _____. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**, 2015. Disponível em: <www.ons.org.br>.

_____. **Informativo Preliminar Diário da Operação**: 11 janeiro de 2016. Rio de Janeiro: ONS, 2016.

PEREIRA, S. *et al.* Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13(3), 2009.

VALDES, A. *et al.* **Série Água Brasil 5**. Impactos e Externalidades Sociais da Irrigação no Semiárido Brasileiro. Brasília: World Bank, 2004.

VENNEMANN, P. *et al.* **Pumped storage plants: status and perspectives**. Essen: VGB PowerTech, 2011.