



GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

ALTERNATIVA DE IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA HÍBRIDA HIDROELÉTRICA E FOTOVOLTAICA FLUTUANTE NO SISTEMA NORDESTE, ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DA FERRAMENTA LCOE

SERGIO PINHEIRO DOS SANTOS(1); ANTÔNIO VAREJÃO DE GODOY(2); VIRGINIA PARENTE(3)
COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SAO FRANCISCO (1)
SENSATTO ENERGIA (2)
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (3)

RESUMO

O sistema híbrido solar-flutuante é uma alternativa de expansão prevista no Plano Decenal 2030. A literatura sobre essa modalidade de geração assinala que através dessa hibridização é possível detectar um aumento na eficiência, redução da evaporação e melhoria na qualidade da água. Este artigo teve por objetivo verificar se através de um estudo de caso que contempla a associação da tecnologia de geração solar fotovoltaica com painéis flutuantes à uma das usinas hidroelétricas da CHESF, a UHE Sobradinho, houve ganhos com a hibridização. Para tanto, foi utilizada a métrica do Custo Nivelado da Energia, da sigla em inglês (LCOE). Com base nos resultados preliminares do estudo de caso analisado, que foi desenvolvido no contexto de um projeto de P&D da ANEEL, verificou-se um aumento da produção de energia na UHE Sobradinho que passou de 133 MW médios para 205 MW médios. Os resultados indicam que esse é mais um caso que essa opção de geração trouxe ganhos importantes e que essa é uma combinação de fontes que deve ser considerada na região. Para que isso ocorra mais fortemente indica-se que há necessidade de aprofundar no arcabouço regulatório da geração híbrida no Brasil, particularmente para o caso do sistema híbrido hidrelétrico e solar-flutuante, para que tais projetos recebam usufruam de uma regulação própria que facilite a sua maior inserção no país.

PALAVRAS-CHAVE

Geração Fotovoltaica; Painéis Flutuantes; Usinas Hidroelétricas; Geração Híbrida; LCOE; Energia Elétrica..

1.0 INTRODUÇÃO

Mudanças significativas na matriz energética mundial ampliaram as opções de expansão da produção de energia. Tais opções apresentam características peculiares. Dentre essas opções destaca-se a associação da geração fotovoltaica através de painéis flutuantes à usinas hidroelétricas já existentes.

No Brasil, o Plano Decenal de Expansão, PDE 2030 (1), indica uma acelerada expansão da fonte de geração solar acompanhada pelos resultados dos últimos certames no ambiente regulado. Em 2020, a capacidade instalada de fotovoltaica centralizada foi de 3,1 GW para 8,4 GW em 2030. Se considerar a geração distribuída, essa expansão é mais proeminente, passando de 4,2 GW em 2020 para 24,5 GW sendo que, em sua maioria, é composta por projetos fotovoltaicos.

Através de um projeto de P&D da Aneel buscou-se analisar pela primeira vez no país uma usina solar flutuante no contexto do planejamento, considerando seus custos e contribuição energética diferenciados em relação aos projetos convencionais. Esta alternativa tecnológica começa a ser indicada como recurso disponível para o Setor Elétrico Brasileiro a partir de 2026, inclusive já definindo o valor de referência para o Orçamento de Investimento (CAPEX, "Capital Expenditure"). Adicionalmente, observa-se uma grande possibilidade de melhor aproveitamento dos reservatórios de usinas hidrelétricas existentes no país, com o emprego da tecnologia fotovoltaica flutuante, já destacadas por Lee et al.(2020) (2) e por Sulaeman et al.(2021), que avaliaram o planejamento desta alternativa (3). Neste contexto, o presente trabalho tem por principal objetivo analisar a alternativa de implantação de uma planta híbrida hidroelétrica e fotovoltaica flutuante no sistema Nordeste, através da aplicação da ferramenta do Custo Nivelado da Energia, do inglês "Levelized Cost of Energy" (LCOE). O LCOE é um indicador largamente utilizado para avaliar e comparar os custos de diferentes tecnologias de geração e, consequentemente, subsidiar a decisão de utilização de uma determinada forma de geração.

Para isso, o presente artigo encontra-se subdividido em cinco seções. Inicialmente é mostrada uma síntese do estado da arte da geração solar Flutuante, bem como das perspectivas e benefícios qualitativos desta geração conforme descrito por Bacelar (4) e por Lee et al. (2). Em seguida, é feita uma revisão da metodologia do LCOE, descrevendo o conceito na versão mais atualizada trazida pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (5) que, inclusive, serviu de referência para análise desenvolvida por Guimarães (6).

Posteriormente, a ferramenta do LCOE é aplicada em cinco situações distintas: (i) Usina Hidroelétrica (UHE) de Sobradinho isolada em operação; (ii) Planta Fotovoltaica Flutuante (Floating Solar Photovoltaics ou FPV) de 1 MW, independente em operação; (iii) FPV de 90 MW em estudo; (iv) Planta Híbrida FPV de 90 MW; e (v) Usina Hidroelétrica de Sobradinho em estudo e Planta Híbrida FPV de 360 MW e Usina Hidroelétrica de Sobradinho, também em estudo. Em cada uma delas, são descritos os dados das fontes, as premissas utilizadas, e realizados os cálculos do LCOE utilizando planilha Excel. Na seção final, são sumarizados os resultados encontrados e os aspectos qualitativos observados, além de serem apresentadas sugestões para futuros estudos a serem desenvolvidos, bem como implicações de política e regulação setorial.

2.0 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Estado da Arte no Mercado de FPV

A participação da geração solar na matriz brasileira e mundial tem crescido de forma substancial nos últimos anos, com uma perspectiva de ainda manter essa tendência de aumento para os próximos dez anos. O próprio PNE 2050 (Plano Nacional de Energia) (7) prevê uma elevação na capacidade instalada de 27 a 90 GW e entre 8 a 26 GW de geração média de energia. A expansão da geração solar é resultado de uma simplicidade construtiva e confiabilidade, aliadas a uma ganhos de escala e um conjunto de incentivos governamentais. A principal limitação desta fonte é a baixa eficiência dos painéis, levando a necessidade de grandes quantidades painéis e de áreas de solo. Por exemplo, uma usina de 1MWp requer uma área de 15.000 m²(8).

Particularmente, o uso da tecnologia solar em meio flutuante merece destaque uma vez que não há necessidade de utilização do solo, além disso, é comum a existência de reservatórios nas proximidades de grandes cidades e em barragens de hidrelétricas (8). As usinas solares Flutuantes favorecem no reaproveitamento destas áreas além de reduzir a evaporação e melhorar a qualidade da água (8), associa-se ainda a outros objetivos, como o problema de proliferação de algas e questões climáticas envolvidas, conforme Lee et al. (2). Observa-se, segundo os mesmos autores, que a capacidade instalada em 2007 era de 1 MW, atingiu 1.314 MW em 2018 e há ainda uma expectativa de se atingir 13.000 MW em 2022; localizadas essas plantas, em sua maior parte na Ásia, sobretudo pelo alto custo da terra.

Muitas dessas plantas têm capacidade instalada inferior a 1 MW, ficando difícil o seu mapeamento, Bacelar (4) mostra uma distribuição das usinas solares flutuantes no mundo até 2017 (Figura 1).

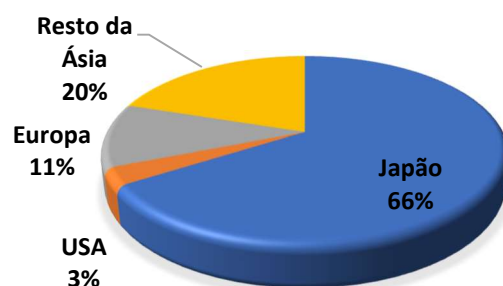


FIGURA 1. Usinas Flutuantes instaladas no mundo (4).

Bacelar (4) atribui este impulso da geração de energia FPV a três motivos precípuos: os incentivos governamentais, o declínio de preço e o aumento da eficiência na produção de energia.

Em apresentação na INTERSOLAR South América de 2020, em painel sobre plantas solares flutuantes, Gustavo Ponte, da EPE (9), registra que existe no Brasil a previsão de seis plantas fotovoltaicas flutuantes, das quais três já se encontram em operação (uma em Sobradinho - BA, uma em Goiás e outra em Porto Primavera - na divisa entre SP e MS).

O produto da avaliação de projetos é a recomendação para investimento que deve ser realizada com base em critérios pré-determinados. Estes critérios devem envolver minimamente os riscos ambientais, socioeconômicos, fundiários e técnicos no intuito de definir quais potenciais deve ser objeto de investimento para elaboração de Projeto Básico. O foco deste trabalho será detalhar a análise preliminar e o estabelecimento dos critérios necessários para a avaliação dos projetos.

2.2 Benefícios adicionados pela tecnologia FPV

A operação de uma planta híbrida solar-hidráulica possibilita agregar diversos benefícios associados, conforme explicitado por Lee et al. (2) e por Bacelar (4), dos quais destacamos, a seguir, os principais.

- O despacho da geração híbrida solar-hidráulica resulta numa operação otimizada do sistema, em função da complementariedade e disponibilidade dos recursos primários. Podendo-se conseguir uma

redução da dependência da disponibilidade hídrica em escala mensal e dos recursos solares, em escala diária ou horária.

- A geração híbrida permite também o armazenamento de energia quando, utilizando-se de recursos solares, evita o uso da água acumulada nos reservatórios.
- Permite, ainda, esse tipo de geração, o aumento do fator de capacidade do conjunto híbrido com a melhor utilização dos sistemas de transmissão, principalmente, quando os recursos solares e de potência hidrelétrica estão distantes do centro consumidor; este fato pode levar, a depender da regulação, a uma redução dos custos de transmissão;
- O sombreamento dos painéis com grande impacto na produção de energia é praticamente eliminado, quando se considera o posicionamento da ilha fotovoltaica no meio de um corpo de água situado mais longe de objetos que causam sombra, como prédios e árvores.
- A influência direta ocasionada na quantidade da evaporação conseguida pela instalação das placas fotovoltaica flutuantes provoca redução da absorção da radiação solar. Segundo Farfan e Breyer (10) a redução global de evaporação pela colocação de plantas FPV com UHE é estimada em 74 bilhões de m³ de água, o que aumenta a sua disponibilidade em 6,3%;
- A disponibilidade de água para limpar a superfície dos painéis e da segurança patrimonial, pela proximidade a uma UHE, contribuem, ainda, para a redução de custos operacionais, segundo Bacelar (4).

2.3 LCOE “*Levelized Cost of Energy*”

O custo nivelado de eletricidade representa uma métrica bastante simples para comparar distintas tecnologias de geração, conforme explicitado pela EPE em publicação de 2018 (5) sobre custos de oferta de energia. Esta ferramenta apresenta como principais variáveis: o custo do investimento, do combustível e do O&M e a energia gerada ao longo do tempo - vida útil do projeto. A EPE incluiu, ainda, neste custo, uma parcela final de descomissionamento. Contudo, na regulação brasileira, para hidroelétricas (11), opta-se pelo “retrofit” ou “overhaul”, o que tem viabilizado a extensão da vida útil do parque gerador, normalmente remunerado pela GAG melhorias (custo de capital por investimento em melhorias).

Por outro lado, Guimarães apresentou de uma forma simplificada o cálculo do LCOE (6), o qual melhor retrata o estudo desta ferramenta para um ciclo de vida útil regulatório, sem que se antecipe a decisão de descomissionamento:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad \text{Equação (1)}$$

onde,

I_t : Despesas de investimento no ano t (incluindo o financiamento);

M_t Despesas de operação e manutenção;

F_t Despesas com combustível no ano t;

E_t Geração de eletricidade no ano t;

r : Taxa de Desconto;

n : vida útil do sistema

Mais recentemente, Ulrich Nissen e Natahanael Harfst (12) apresentaram um estudo que traz uma nova abordagem quando avaliam a possibilidade de um investimento ser feito desde que tenha um VPL (valor presente líquido) positivo, mesmo que apresente um valor para o LCOE abaixo do preço corrente da energia.

2.4 Usinas Estudadas

O desenvolvimento deste estudo para implantação de uma planta híbrida composta de UHE e FPV, através da aplicação da ferramenta do LCOE, tomou por base duas plantas: a UHE Sobradinho e a FPV de 1 MW, ambas em operação, sendo esta última, uma unidade protótipo de um projeto de pesquisa e desenvolvimento em fase final na CHESF.

Adicionalmente, foram inseridas no estudo (i) uma planta de 90MW isolada e duas híbridas: (ii) a associação da hidrelétrica de Sobradinho com uma FPV de 90MW e (iii) a associação da UHE Sobradinho com uma FPV de 360MW. Tendo sido esta última concebida para propiciar uma sensibilidade do conjunto híbrido com a potência da componente fotovoltaica, limitado à capacidade de escoamento no barramento de transmissão da UHE Sobradinho.

2.4.1 UHE Sobradinho

Conforme dados levantados na Ficha Técnica da ANEEL (13):

- Trata-se de uma usina hidrelétrica de gravidade, composta de 6 unidades geradoras de Potência instalada nominal de 1.050,3 MW, com garantia física de 531 MW_{med.}, integrante do SIN - Sistema Interligado Nacional.
- A UHE Sobradinho tem uma vazão média de longo termo de 2800 m³/s, vazão firme de 799 m³/s e mínima média mensal de 640 m³/s. O reservatório tem uma área inundada máxima normal de montante de 4214 km² e uma área inundada mínima normal de montante de 1115 km².

A Figura 2 mostra o levantamento dos dados do portal do ONS, num histórico de dez anos da operação desta UHE (14) permite a captura de uma geração máxima de 4.148 GWh em 2012 e uma geração mínima de 1.162 GWh em 2017. Com este perfil histórico de geração de energia, pode-se concluir que esta hidrelétrica tem uma geração média anual de 2.367 GWh/ano.

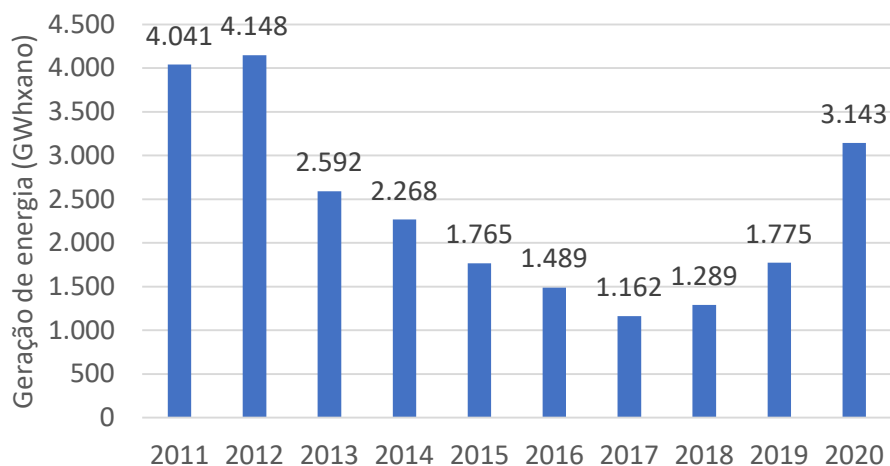


FIGURA 2: Histórico de Geração da UHE Sobradinho (GWh x ano)

2.4.2 UHE Sobradinho FPV do Projeto de P&D ANEEL PD-00372-9990/2015

Conforme apresentado nos dados levantados por Bacelar (4), a usina fotovoltaica de Sobradinho é um sistema de geração de energia de 1 MW_p, composto por 3.792 painéis solares, montados sobre flutuadores ligados entre si para formar uma ilha solar de 10.000 m². O sistema é composto por 158 conjuntos (strings) conectados em paralelo com 24 módulos Canadian Solar CS6P265 W_p em um único inversor WEG.

Esta planta apresentou durante o exercício de 2019 o perfil mensal de geração conforme Figura 3 a seguir, com uma geração média anual de 1.789,0 MWh/ano.

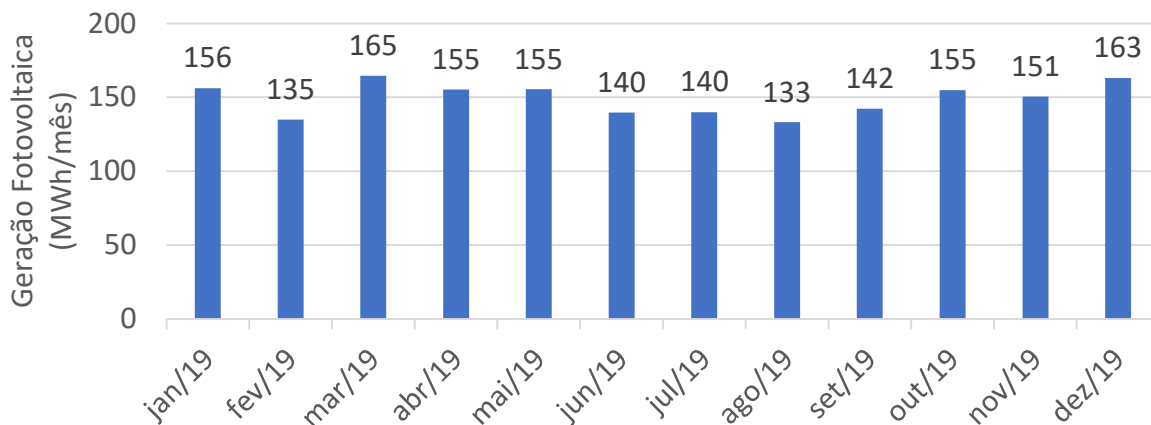


FIGURA 3: Histórico de Geração da FPV Sobradinho (MWh/mês)

Na Figura 4 é possível se ter uma ideia da área ocupada por esta planta fotovoltaica em operação na UHE Sobradinho. Há um grande potencial para expansão em função da grande área disponível.



FIGURA 4: Planta de Geração Fotovoltaica Flutuante de 1 MW.

2.4.3 Planta de Geração Fotovoltaica Flutuante de 90 MW

Observou-se que a planta flutuante de 1 MW não teria geração representativa para uma posterior avaliação comercial na planta híbrida, enquanto um projeto de 90 MW permite uma avaliação espacial de uma futura planta híbrida, conforme descrito por Lee et al. (2); também a planta de 90 MW mantém os benefícios tributários associados ao limite de uma geração de 30 MW, optando-se pelo uso de três unidades de 30 MW, com três distintos registros comerciais (21).

Desta forma, conforme descrito anteriormente e apresentado por Bacelar em seu estudo (4), tem-se para a planta de 1 MW, uma área de 10.000 m², e uma energia média medida de $E_{\text{média}} = 1789 \text{ MWh/ano}$. Segundo Lee et al. (2), uma capacidade de potência de 1 MW por hectare, aplicado a uma planta de 90 MW, significa área 90 hectares (900.000 m² ou 0,9 km²), menos de 0,1% da área média mínima do reservatório de Sobradinho.

Além de ser pouco representativa do ponto de vista da área média mínima do reservatório de Sobradinho (menos de 0,1%) é possível dispor a planta em uma ilha ou em três ilhas solares-flutuantes com uma distância máxima de 25 km (considerado por Lee et al. (2) como limite para utilização da transmissão existente na UHE). Somado a este requisito espacial avaliado para a planta de 90 MW, foi verificado que esta potência representa menos de 25% da capacidade de escoamento do barramento de 230 kV do SIN, no ponto de conexão, conforme Nota Técnica do ONS (15) referente à capacidade de escoamento remanescente para o leilão A-4 2020.

2.4.4 Planta de Geração Híbrida de Sobradinho e da Fotovoltaica Flutuante de 90 MW

Neste trabalho, se considerou a usina de geração de energia híbrida, na forma mais genérica (2), no qual são associadas duas plantas de geração com fontes primárias distintas em um único ponto do sistema. A EPE conceitua esta usina, de forma mais restrita, como usinas associadas (16), uma classificação do sistema de geração híbrido, conforme apresentado no diagrama da Figura 5.

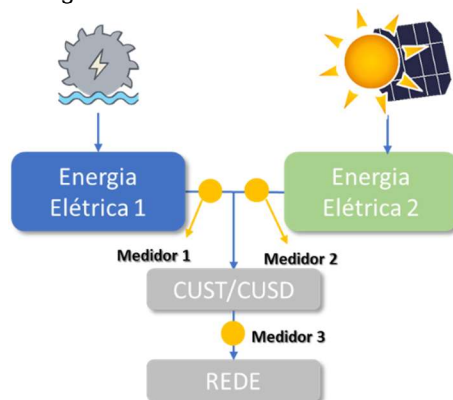


FIGURA 5: Usinas Associadas (16)

Esta planta associa a UHE de Sobradinho em operação com uma FPV de 90 MW, concebida para ser conectada no mesmo ponto da Rede Básica. Neste projeto, não foi considerado nenhuma redução do CAPEX por aumento do volume de painéis ou de flutuadores ou do OPEX pela utilização do sistema de pessoal, material e equipamentos que hoje desenvolve o O&M da UHE de Sobradinho.

2.4.5 Planta de Geração Híbrida de Sobradinho e da Fotovoltaica Flutuante de 360 MW

A última planta concebida para o presente estudo é composta pela associação da UHE Sobradinho com uma fotovoltaica flutuante de 360 MW (12x 30 MW). A aplicação do LCOE tem como objetivo fazer uma análise do efeito do acréscimo de potência na FPV, dentro do limite de escoamento do Sistema de Transmissão, no ponto de conexão

com a Rede Básica, e da área disponível na superfície do reservatório da UHE. Excepcionalmente, apenas neste caso dos cinco estudados, foi considerado uma economia de 10% no CAPEX e de 50% no OPEX, pela utilização dos recursos de O&M disponíveis para a UHE em operação.

2.5 Considerações e Premissas Econômicas nas Simulações

A fim de atingir o objetivo deste trabalho com a aplicação do LCOE aos cinco projetos analisados, algumas premissas foram observadas:

- A vida útil de 30 anos para a UHE Sobradinho que teve como fundamento a Lei nº 14.052/2020 (17) que estendeu a outorga da UHE Sobradinho em sete anos e a Lei nº 14.182/2021 (18) que prorrogou as concessões das demais hidrelétricas da Chesf mediante pagamento de bônus de outorga.
- Os leilões de energia solar do mercado regulado têm atribuído um prazo de 20 anos para o contrato de concessão (22), com o retrofit do sistema inversor a cada 10 anos, conforme orientação do fabricante dos inversores da usina piloto de 1 MW (WEG) (21). A vida útil de todas as plantas fotovoltaicas flutuantes analisadas foram consideradas como sendo de 30 anos, porém, com investimentos em retrofit a cada 10 anos, nos valores dos respectivos CAPEX.
- Devido às diversas incertezas sobre o descomissionamento das plantas fotovoltaicas, cujo avanço tecnológico tem sido excepcional ao longo do tempo (8), além da história de renovação de concessões das usinas hidroelétricas (20) sempre com extensão da vida útil e retrofit dos componentes, adotou-se a premissa de que não deverá ser feito um descomissionamento das plantas, mas um reinvestimento nas mesmas.
- Para os valores de investimentos ou de orçamento do CAPEX e O&M foram utilizados os valores médios de investimentos de referência da EPE para UHE (16). No caso da FPV, os valores de CAPEX e O&M foram obtidos do PDE 2030(1).
- Para efeito da taxa de câmbio, foi considerado 1US\$ = R\$ 5,189 no fechamento do exercício de 2020 (23) e da taxa de desconto foi considerada o valor do WACC regulatório de 2019 de 7,19% a.a. (24).

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo de implantação de uma planta híbrida das tecnologias hidrelétrica e fotovoltaica flutuante, através da aplicação da ferramenta do LCOE e dos benefícios qualitativos associados, foram feitas análises comparativas de cinco situações:

- (a) UHE Sobradinho em operação;
- (b) FPV de 1 MW, também em operação, construída para um projeto de pesquisa e desenvolvimento da CHESF;
- (c) FPV de 90 MW;
- (d) Usina Híbrida da UHE Sobradinho com a FPV de 90 MW e
- (e) Usina Híbrida da UHE Sobradinho com FPV de 360 MW.

As fontes primárias dos dados de geração foram: os dados históricos de geração média anual da UHE Sobradinho, levantados, a partir dos últimos dez anos do portal do ONS (14); os dados do projeto de pesquisa de desenvolvimento em operação, medidos e descritos por Bacelar (4) e considerações do trabalho desenvolvido por Lee et al. (2) e por Sulaeman et al. (3) para avaliação do potencial técnico global dos sistemas híbridos fotovoltaicos, aplicado em plantas hidrelétricas. Os dados econômicos de CAPEX e O&M foram extraídos dos custos apresentados por estudo da EPE (16) para a geração hidrelétrica e do PDE 2030, em consulta (2) para a fotovoltaica flutuante. Os dados técnicos de ambas as plantas foram levantados a partir dos trabalhos de Bacelar (4) e da ANEEL (11).

Os dados de geração foram considerados em base anual, tanto para a geração hidroelétrica, quanto para a geração fotovoltaica flutuante. A primeira, calculada a partir do valor médio gerado nos últimos dez anos, horizonte que consegue refletir tanto os picos, quanto os vales de geração. A segunda foi levantada a partir dos valores medidos no projeto em operação. Para os dados econômicos de investimento, foi feita opção da NT de custos (11) para a hidrelétrica e no caso da planta fotovoltaica flutuante, foi utilizado o PDE 2030 (1). A utilização dos custos efetivos do projeto de 1 MW não refletiriam os efeitos de escala, ou mesmo os efeitos de evolução tecnológica, haja vista que o projeto foi contratado há seis anos, sendo a primeira usina fotovoltaica flutuante em operação no país.

O LCOE (*“Levelized Cost of Energy”*) ou Custo Nivelado de Energia é uma ferramenta consagrada para avaliação dos custos unitários de geração de eletricidade, normalmente medido em US\$/MWh e, apesar de levantada extensa revisão bibliográfica no início deste trabalho, foi feita a opção pela formulação da EPE (6) e de Guimarães (7), aplicado a um prazo de 30 anos - prazo da extensão da concessão de Sobradinho. Para o caso da FPV foi considerado no investimento o valor de retrofit dos inversores, a cada 10 anos (16), até completar o período de 30 anos, equivalente ao da UHE Sobradinho.

Todas as fontes de dados, materiais e análises foram limitadas a publicações dos últimos dez anos, preferencialmente, dos últimos cinco anos. No caso dos Relatórios técnicos da EPE, o histórico da pesquisa se restringiu aos últimos três anos, sendo estudado não apenas o último PDE oficialmente aprovado, mas aquele ainda em consulta pública.

Finalmente foi desenvolvida uma análise dos resultados obtidos, dos benefícios qualitativos levantados e dos estudos a serem desenvolvidos em trabalhos futuros.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizados os estudos e as simulações para o Cálculo do LCOE, fundamentados nos materiais e métodos apresentados, foram obtidos os resultados conforme Tabela 1. Dos resultados apresentados observa-se que, mesmo sem nenhuma otimização do sistema, principalmente no tocante aos custos de operação e manutenção da híbrida, houve um aumento de 7% do LCOE da UHE Sobradinho ao ser instalado um sistema híbrido, com um incremento na potência nominal de 90 MW, ou seja, cerca de 9% da potência nominal instalada desta UHE. Este aumento na potência nominal instalado produz um incremento na energia descontada que atinge um montante de 7%, igual ao aumento do investimento, todavia, nesse resultado não está refletido o ganho de geração nos períodos de baixa afluência hidrológica. No caso da UHE Sobradinho este fato é relevante quando se observa que o fator de capacidade médio verificado da UHE isolada. Ao longo dos últimos 10 anos, é 0,25 e, em determinados períodos, com uma hidrologia mais desfavorável atingiu um montante de 0,12. A melhoria resultante da implementação de geração adicional utilizando outra fonte primária de energia, no caso, a irradiação solar mais forte nos períodos secos, produz um aumento deste fator de capacidade do sistema de geração híbrido.

TABELA 1: Resultados do Cálculo do LCOE

| USINA-SISTEMA | P nominal (MW) | LCOE (US\$/ MWh) |
|--------------------------|----------------|------------------|
| 1.Fotovoltaica Flutuante | 1 | 55,65 |
| 2.Fotovoltaica Flutuante | 90 | 54,63 |
| 3.Hidrelétrica | 1050 | 95,70 |
| 4.Híbrida | (1050 + 90) | 100,54 |
| 5.Híbrida Limitrofe | (1050 + 360) | 112,20 |

No período de menor afluência hidrológica dos últimos dez anos, conforme os resultados históricos da operação da hidrelétrica (14), há um ganho de 13% na energia média (MW médio) gerada. Neste período, a UHE Sobradinho gerou 133 MW médios, enquanto com a solar flutuante implantada poderia ter sido gerado 151 MW médios. Adicionalmente, considerando a situação particular do reservatório de Sobradinho, onde existe baixo fator de capacidade, possibilidade de escoamento adicional de um valor próximo a 400 MW no sistema de transmissão e disponibilidade de área superficial para a planta FPV, foi simulado um sistema híbrido adicional com uma FPV de 360 MW. Neste caso, um incremento de 38% na energia descontada gerada pelo sistema híbrido é conseguido produzindo um acréscimo de apenas 15% no LCOE, em relação à hidrelétrica de Sobradinho operando isoladamente. Neste caso, considerou-se, entretanto, o mesmo nível de investimento no retrofit e custo de manutenção da híbrida de 90 MW. Este acréscimo de geração pode, considerando o rendimento medido para a solar flutuante experimental, aumentar a geração de Sobradinho de 133 MW med no pior momento de geração, para 205 MW med. Vale salientar que os resultados obtidos são compatíveis com as indicações para o crescimento da matriz elétrica da fonte solar indicado no Plano Decenal (1). Haverá uma redução substancial da participação da geração hidrelétrica nesta matriz e de aumento da geração solar.

Uma das importantes constatações observadas neste trabalho e que reflete a realidade dos dois últimos Planos Decenais, está presente na vantagem de se implantar uma FPV em uma hidrelétrica existente, em detrimento de construção de nova hidrelétrica. A híbrida representaria a solução de expansão mais eficiente para a empresa proprietária da UHE existente, principalmente em UHE com grande reservatório e baixo fator de capacidade, como a UHE Sobradinho.

Mesmo não sendo quantificado, o efeito da redução da evaporação associado ao efeito energético de armazenamento e otimização do despacho hidrelétrico utilizando a fonte solar é extremamente positivo para o sistema. Lembrando que com o acréscimo anual da geração solar, existe a otimização do despacho, face à geração solar inflexível no período próximo do intervalo de 6:00 às 18:00 horas.

Finalmente, enquanto Sulaeman (3) indica o sistema de geração solar flutuante como um caminho para a solução de hidrelétrica com baixa produção de energia na Amazônia, os resultados obtidos neste trabalho e os benefícios agregados sinalizam como possível e importante para o Nordeste a implantação do sistema híbrido solar-flutuante no reservatório de Sobradinho, estendendo-se aos demais reservatórios hidrelétricos do Nordeste, como o de Itaparica e o de Boa Esperança, onde a hidrologia tem provocado uma redução na produção de energia, além de fato de os índices solarimétricos nesta região serem muito superiores aos demais do país.

5.0 CONCLUSÃO

Os resultados da análise empreendida indicaram que o sistema híbrido de geração solar-flutuante em reservatórios de hidrelétricas existentes, que já é uma alternativa de geração prevista no Plano Decenal 2030, pode

constituir-se numa solução viável para aumentar a eficiência e permitir a expansão da geração renovável na Usina Hidroelétrica de Sobradinho e nos demais reservatórios existentes da região Nordeste com características similares. Ademais, a ferramenta do Custo Nivelado de Energia (LCOE), além de se ter se mostrado adequada para avaliação da geração híbrida, confirmou que com um baixo investimento (proporcionalmente a outras gerações hidrelétricas) foi possível se obter, para o caso da UHE Sobradinho, um aumento da energia gerada e uma melhoria no fator de capacidade deste sistema de geração.

A bibliografia estudada ressaltou uma série de benefícios agregados que foram qualificados neste estudo como: (i) a redução da evaporação dos reservatórios de hidrelétricas; (ii) a redução da temperatura de operação dos painéis; e (iii) a redução do sombreamento destes, produzindo o aumento da eficiência do painel. Tais ganhos poderão ser estudados, medidos e quantificados com maior aprofundamento, em estudos futuros inclusive porque o projeto de P&D da planta protótipo ainda não está totalmente concluído.

Vale destacar que a viabilidade da expansão para o caso de Sobradinho foi analisada com premissas conservadoras, como o limite da planta FPV associada à capacidade máxima de escoamento, através do sistema de transmissão existente, mesmo havendo área de superfície disponível; nenhuma ou baixa otimização dos custos de operação e manutenção. Porém, a operação otimizada híbrida (ou associada) demanda estudos adicionais em função da geração horária histórica, tanto da geração hidrelétrica de Sobradinho, quanto da geração solar-flutuante, mas a expectativa é de que possam trazer ganhos para o sistema elétrico da região.

Dentre os valores agregados, a utilização do reservatório de Sobradinho como uma bateria para a geração solar-flutuante, permite o despacho hidrelétrico nos momentos de baixa incidência solar e o despacho solar ao longo do dia, contribuindo para a otimização do ganho diário, mensal e anual.

Merece atenção a necessidade de se aprofundar o tema regulatório da geração híbrida, particularmente para o caso do sistema híbrido hidrelétrico e solar-flutuante. Para tanto, conforme indicado vale considerar o limite da capacidade de transmissão definida pelo ONS, visando evitar o corte de geração ("constrained off"), mesmo não havendo restrição espacial para a ampliação do sistema híbrido.

Adicionalmente destacou-se a importante de que sejam avaliados posteriormente, os impactos do ganho de eficiência com o desenvolvimento tecnológico dos painéis fotovoltaicos e com a operação dos painéis em temperatura mais baixa, bem como a evolução do flutuador. Também, necessitam ser mais bem quantificados os ganhos com o aumento do volume de painéis e de flutuadores (por exemplo, ao crescer a FPV de 1 MW, para 90 MW e de 90 MW para 360 MW), que demandam um estudo específico e interação junto aos fornecedores.

Ainda do ponto de vista tecnológico, vale registrar a necessidade de se estudar a aplicação de *tracker* em estruturas flutuantes e o impacto dos prazos de investimento no *retrofit* da planta solar. Tais aspectos foram tratados neste trabalho, de forma conservadora.

Por fim, constata-se que há implicações de política energética decorrentes da adoção da hibridização. Com a perspectiva de a hibridização estar cada vez mais presente no *mix* energético nacional, uma regulação específica que facilite os investimentos nessa modalidade de geração, certamente contribuirá para a expansão da capacidade, para a modicidade tarifária e para a segurança energética no país.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. Plano Decenal de Expansão (PDE) 2030, dezembro/2020.
- (2) Nathan Lee et al. Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower system: Benefits and Global Assessment of technical potential. *Renewable Energy* 162 (2020). Publicado pela Elsevier Ltd. (1415-1427).
- (3) Samer Sulaeman et al. Floating PV System as alternative pathway to the amazon dam underproduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021) 110082. Publicado pela Elsevier Ltd. (1-12).
- (4) Bacelar, Souto Tarcisio. Características das condições ambientais no reservatório da UHE Sobradinho no contexto da geração solar flutuante. 2019. 92 f. Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Recife, PE.
- (5) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. Nota Técnica PR 07/2018. Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050. Rio de Janeiro, novembro/2018.
- (6) Leonam dos Santos Guimarães. O CUSTO NIVELADO DA ENERGIA E SEU IMPACTO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. FGV Energia Caderno Opinião, junho/2019
- (7) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, dezembro/2020.
- (8) Cazzaniga, Raniero, et al. "Integration of PV floating with hydroelectric power plants." *Heliyon* 5.6 (2019): e01918.
- (9) INTERSOLAR SOUTH AMERICA, 2020, Session: "Floating Solar PV Farms: Trends and Prospects", apresentação de Gustavo Pires da Ponte (EPE): "Floating PV in the Energy Planning", dezembro/2020.
- (10) J. Farfan; C. Breyer. Combining floating solar photovoltaic power plants and hydropower reservoirs; a virtual battery of great global potential, *Energy Procedia* 155 (2018) 403-411.
- (11) ANEEL. Resolução Homologatória 2.421/ 2018 - Homologação as Receitas Anuais de Geração das usinas hidrelétricas em regime de cotas, 2018.
- (12) Ulrich Nissen; Nathanael Harfst. Shortcomings of the traditional "levelized cost of energy" [LCOE] for the determination of grid parity. *Energy* 171 (2019) Publicado pela Elsevier Ltd. 1009-1016.

- (13) ANEEL. Ficha Técnica da Usinas Hidrelétricas. Usina Hidrelétrica de Sobradinho, Anexo 3. Disponível em: www.aneel.gov.br.
- (14) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, ONS. Resultados da Operação para UHE de Sobradinho. Disponível <[http:// www.ons.org.br /Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx](http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx)>.
- (15) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, ONS. Nota Técnica do ONS _ LEN A-4/2019: QUANTITATIVOS DA CAPACIDADE REMANESCENTE DO SIN PARA ESCOAMENTO DE GERAÇÃO PELA REDE BÁSICA, DIT E ICG, 13 de maio de 2019.
- (16) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. Nota Técnica EPE-DEE-NT-011/2018-.USINAS HÍBRIDAS Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento. r0 Rio de Janeiro, 11 de junho de 2018.
- (17) BRASIL, Lei nº 14.052/2020.
- (18) BRASIL, Lei nº 14.182/2021.
- (19) Pieter de Jonga; Asher Kiperstok; Ednildo A Torres. Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in Brazil, Renewable and Sustainable Energy Reviews, August 2015
- (20) BRASIL, Lei 12.783/2013
- (21) WEG _ Informação formal por e-mail para orçamentação de Planta Solar.
- (22) ANEEL, Informações dos Editais e Contratos de Concessão de Geração Solar. Disponível em: www.aneel.gov.br.
- (23) www.economia.uol.com.br, taxa de câmbio comercial de fechamento de dezembro de 2019.
- (24) www.aneel.gov.br, wacc regulatório de geração.

DADOS BIOGRÁFICOS



(1) SERGIO PINHEIRO DOS SANTOS - Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2005), obteve o grau de Mestre pelo na mesma instituição em 2008 e Doutor pela Universidade Federal do Pernambuco (2019). Desde 2009, é engenheiro na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF, atuando na área de Planejamento da Expansão (2009-2021) e de Estratégia Empresarial e Gestão de Participações (2021). Tem experiência na área de planejamento da expansão e armazenamento de energia, novos negócios e integração de novos empreendimentos ao sistema interligado.

(2) ANTÔNIO VAREJÃO DE GODOY - Possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFPE (1985), especialização em Finanças Empresariais pela FGV (2000) e mestrado em Engenharia Elétrica pela UNICAMP (1989). Engenheiro da Chesf desde 1993, ocupou diversos cargos gerenciais, incluindo o de Presidente (2015) e Diretor de Engenharia (2017). Atuou como Diretor de Geração (2019) na Eletrobras e foi Presidente dos CA's da Norte Energia ELETRONUCLEAR, AmGT, CGTEE e CEPEL. Atualmente é Diretor da Sensatto Energia e membro Conselho de Administração do Cigré Brasil e Honoray Member e Distinguished Member do Cigré Paris.

(3) VIRGINIA PARENTE - Economista pela UnB com doutorado em Finanças, pós-doutorado em Energia, e intercâmbio na Universidade de Nova York. Por mais de 10 anos foi executiva de bancos de investimento, atuando em financiamento para infraestrutura. Atualmente é professora do Instituto de Energia e Ambiente da USP, tendo orientado mais de 30 mestres e doutores, e também é diretora da FIESP, atuando como colaboradora no DEINFRA. Integra conselhos de administração, tendo sido conselheira da ELETROBRAS e da CHESF, dentre outras empresas. Com vivência nas esferas pública e privada, seus temas de interesse incluem: Planejamento Energético e Estratégico, ESG, Perícia, Arbitragem, e Regulação.