

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE USINA FOTOVOLTAICA FLUTUANTE NA BARRAGEM DA HIDROELÉTRICA DE BOA ESPERANÇA - PI

Pedro Higor Sousa Guedes

Breno Bezerra Freitas – brenobf93@gmail.com

José Janiere Silva de Souza

Fernando Luiz Marcelo Antunes

Paulo Cesar Marques de Carvalho

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

4.3. Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados

Resumo. O presente artigo tem como objetivo identificar o potencial de geração de uma usina fotovoltaica flutuante (FVF) instalada na barragem da Usina Hidroelétrica (UHE) de Boa Esperança, com uma área útil de 248,30 km². Através dos dados da UHE em questão, disponíveis nos sites do Operador Nacional do Sistema (ONS) e da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), são feitos comparativos com os resultados obtidos para uma usina FVF. São propostos seis cenários, em que os três primeiros fazem referência às instalações com módulos fotovoltaicos (FV) de 480 Wp e os outros estão relacionados com módulos de 665 Wp. Os três cenários de cada caso são definidos para áreas de 1,64 km², 8,19 km² e 16,39 km², que correspondem a 1%, 5% e 10% da área útil do corpo d'água, considerando o percentual destinado aos espaçamentos entre os módulos para movimentação dos técnicos. A potência instalada dos cenários varia entre 350,42 MWp e 3.641,78 MWp e a geração anual varia entre 675,33 GWh e 7.018,43 GWh. Estes valores são comparados com os dados obtidos com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a CHESF e o ONS e são feitas análises do impacto dos variados cenários no que concerne aos diferentes aspectos do setor elétrico no Brasil, no Nordeste, no Ceará e no Piauí.

Palavras-chave: Solar fotovoltaica, Fotovoltaica Flutuante, Usina Hidroelétrica.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as Usinas Hidrelétricas (UHE) possuem a maior capacidade instalada entre todos os tipos de fontes no Sistema Interligado Nacional (SIN), o que representa, em termos percentuais, 53% da matriz elétrica brasileira em 2023 (ONS, 2023c). Tal fato demonstra a grande dependência nacional de um regime de chuvas que seja capaz de manter os níveis hidrológicos adequados. Segundo o ONS, em agosto de 2021, o Brasil bateu recorde de geração elétrica por termelétricas (considerando o início da série histórica em 1999) (ONS, 2023b). Isto é resultado da pior crise hídrica nacional em anos e da maior oferta de usinas térmicas no País.

A necessidade de uso termelétricas vai na contramão do que está sendo incentivado no mundo, onde há debates que favorecem o crescimento do uso de fontes renováveis e a descarbonização da atmosfera. Para 2027, o ONS prevê um aumento de capacidade instalada para este tipo de instalação de apenas 738 MW, representando uma queda na influência destas usinas para o patamar de 47,98% da Matriz Elétrica do mesmo ano (ONS, 2023c).

Neste contexto, segundo o ONS, os sistemas fotovoltaicos (FV) representarão 7,58% da matriz de energia elétrica do SIN em 2027, sem considerar os dados de micro e minigeração distribuída, o que indica um crescimento em relação aos 4,94% apresentados em junho de 2023 (ONS, 2023c). Dados da Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR) de outubro de 2023, registram 34.228 MW de potência instalada no País para esta fonte de geração (ABSOLAR, 2023). Vale ressaltar que estes números estão dentro do cenário mundial que, segundo relatório da *SolarPower Europe*, atingiu, no começo de maio de 2022, 1 TW de capacidade instalada para a fonte de produção em questão e, ao mesmo tempo, projeta que o mundo alcançará o dobro deste valor em 2025 (SolarPower Europe, 2022).

O contexto citado engloba os mais diversos tipos de tecnologias FV desenvolvidas pelas mais diferentes empresas, centros de pesquisa e universidades, nos quais está presente as usinas fotovoltaicas flutuantes (FVF). De acordo com Canal Solar (2023), o mercado global de energia solar FVF pode dobrar até 2031, ultrapassando 6 GW de potência instalada. Além disso, segundo PV Magazine (2022), em janeiro de 2022, a China colocou em operação a maior usina FVF do mundo, com capacidade instalada de 320 MW, exemplificando os diversos investimentos feitos para estes tipos de construção.

No Brasil, há uma expectativa desta tecnologia, em 2024, atingir 200 MW, na modalidade de Geração Distribuída (GD) (ABSOLAR, 2022). O estudo do Grupo Banco Mundial apresenta uma estimativa do potencial da capacidade instalada da FVF (em GWp) em reservatórios para cada continente. Com relação à América do Sul, foram avaliados 299 corpos d'água, resultando em potencial de plantas FVF de 36 GWp, 181 GWp ou 361 GWp, para 1%, 5% ou 10% de área superficial utilizada, respectivamente (World Bank Group, 2019).

Neste âmbito, o presente artigo busca auxiliar nos diversos estudos que estão sendo feitos para que este tipo de sistema FV seja desenvolvido, pois quanto mais construções forem feitas a tendência é que os custos reduzam e a viabilidade dos projetos aumentem.

Os sistemas FVF possuem inúmeras vantagens em relação às usinas convencionais, como a presença de menos obstáculos para bloqueio da luz solar, a melhor eficiência energética, a reduzida temperatura dos painéis, o reduzido efeito da sujeira e a salvaguarda de terras (Sahu *et al.*, 2016).

No entanto, alguns problemas ambientais podem ser causados por plantas FVF: a possibilidade de repercussões em áreas ecologicamente protegidas e vulneráveis; a possível redução da população de algas devido à redução de luz solar e da fotossíntese; o potencial prejuízo à qualidade da água devido ao silício presente nos módulos e ao polietileno de alta densidade presente nos flutuadores; os eventuais acidentes elétricos envolvendo cabos subaquáticos. Na Fig. 1 é possível visualizar uma das formas de instalação deste tipo de sistema.

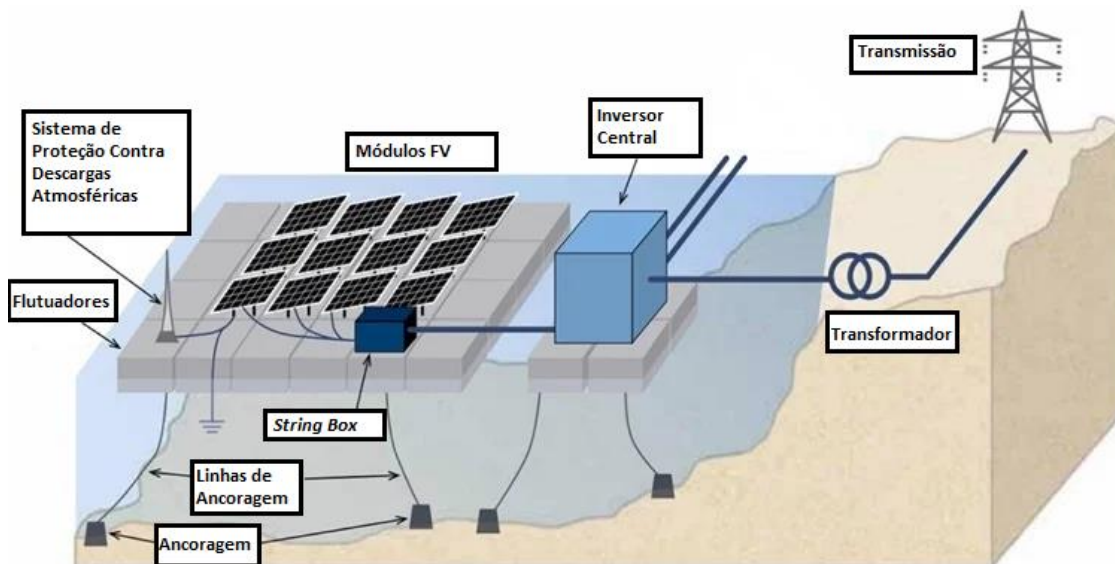


Figura 1 – Estrutura de um sistema FVF.

Tendo em vista as vantagens e desvantagens supracitadas, para exemplificar o potencial deste tipo de instalação no Brasil, em Lima *et al.* (2023) é pesquisado o impacto da geração FVF sobre a matriz energética de estados do semiárido brasileiro. Neste contexto, é considerado que as plantas FVF podem aproveitar a extensa rede de reservatórios já instaladas na região e os altos índices de irradiação solar. O potencial de geração investigou dois cenários: um com módulos FV de 265 Wp e outro com módulos FV de 380 Wp.

Através do uso de curva de permanência (CP), com confiabilidade considerada de 80%, são determinadas as capacidades das usinas FVF de modo a comparar as gerações destas com o consumo anual de energia elétrica dos estados analisados, em 2020. Como resultado, é constatado que estas usinas, além de propiciarem uma alternativa de geração limpa e sustentável, podem suprir total ou parcialmente a demanda elétrica de seus respectivos estados. O Ceará (CE) tem uma perspectiva de geração de 18,15 TWh para o cenário 1 e 20,99 TWh no cenário 2; para o Rio Grande do Norte (RN) a geração é de 16,89 TWh e 19,54 TWh para os cenários 1 e 2, respectivamente; a Bahia (BA) tem uma expectativa de produção de 9,76 TWh para o primeiro cenário e 11,29 TWh para o segundo. O reservatório Eng. Armando Ribeiro Gonçalves apresentou os maiores valores percentuais: 227% e 263% do consumo do RN para os casos 1 e 2, respectivamente.

2. METODOLOGIA

No presente capítulo é apresentada a metodologia de dimensionamento de plantas FVF em reservatórios de UHE, tomando como base a superfície do corpo d'água disponível e seu histórico de regime hidrológico. Para o dimensionamento de plantas FVF nas condições apresentadas, é necessária a observação de alguns aspectos técnicos que serão abordados posteriormente, os quais são: área ocupada, potência dos módulos FV e hidrologia. Outros aspectos importantes, como a estrutura de flutuação, o sistema de ancoragem, a análise da proximidade com a rede elétrica, a orientação e a inclinação são sugestões de estudos futuros.

A metodologia proposta de dimensionamento é subdividida da seguinte forma:

- Obtenção e análise de dados históricos de geração;
- Obtenção e análise das áreas disponíveis;
- Cálculo da capacidade instalada FVF, produção anual de eletricidade e comparação com a geração da UHE.

Com relação aos pontos “a” e “b”, estas análises são feitas, principalmente, com os dados disponíveis nos sites do ONS, do Ministério de Minas e Energia (MME) e da Agência Nacional de Águas (ANA), os quais fornecem subsídios

para apresentação dos números observados, que foram tratados para facilitação do estudo. O ponto “c” diz respeito às análises mais matemáticas que serão desenvolvidas na seção seguinte, pois neste há apenas a estruturação dos conceitos e bases necessárias para o bom desenvolvimento do trabalho.

2.1. Características da área de estudo

A UHE de Boa Esperança encontra-se em operação pela CHESF e está localizada entre os municípios de Guadalupe - PI e São João dos Patos - MA. Na Fig. 2 é apresentada a localização da UHE Boa Esperança, pelo googlemaps (2023)).

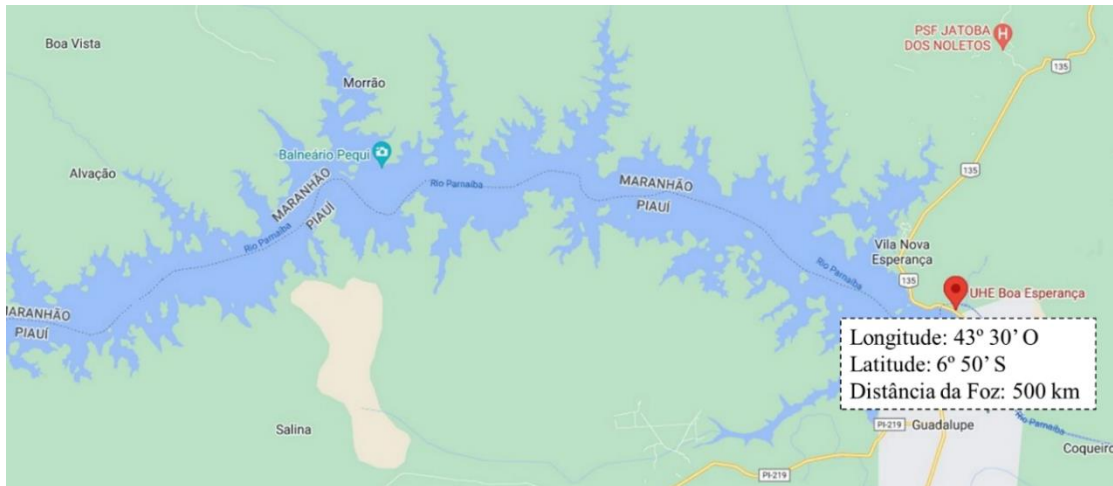


Figura 2 – Localização da UHE Boa Esperança.

Em área de drenagem a UHE Boa Esperança possui 87.500 km² e capacidade máxima de armazenamento de 5.085 hm³. Sua estrutura de barragem é do tipo mista terra-enrocamento possuindo altura máxima de 53 m e comprimento de crista de 5.212 m. A geração possui turbinas do tipo Francis, sendo duas de 55 MW e duas de 63,65 MW, totalizando capacidade instalada de 237,3 MW (CHESF, 2023).

2.2. Análise do histórico anual de geração da UHE Boa Esperança

Para essa análise são utilizados os dados de geração da UHE Boa Esperança no período 2012-2022. Desse modo, há condições de se observar movimentos de transição entre o período chuvoso e seco, além de possíveis anomalias.

Na Fig. 3 são apresentadas as produções anuais entre 2012 e 2022, bem como é representado o percentual de acréscimo/decrécimo em relação à média anual do período (1.086,34 GWh), de acordo com ONS (2023b).

A geração anual em 2013, 2015, 2016, 2017, 2019 e 2020 foi menor do que o valor da média anual. Para este intervalo os anos de 2012, 2014, 2018, 2021 e 2022 apresentaram produção superior à média anual. Os cenários mais críticos de produção são verificados em 2016 (-15,81%), 2017 (-8,04%) e 2015 (-7,72%). Segundo Zambon (2015) e Borges (2021), entre o fim de 2012 e início de 2020, a ocorrência de longos períodos de secas nas principais bacias hídricas nacionais provocou a redução da participação das hidroelétricas na matriz elétrica, e como consequência foram registrados maiores despachos de termoeletricas e diminuição do volume nos reservatórios das UHE.

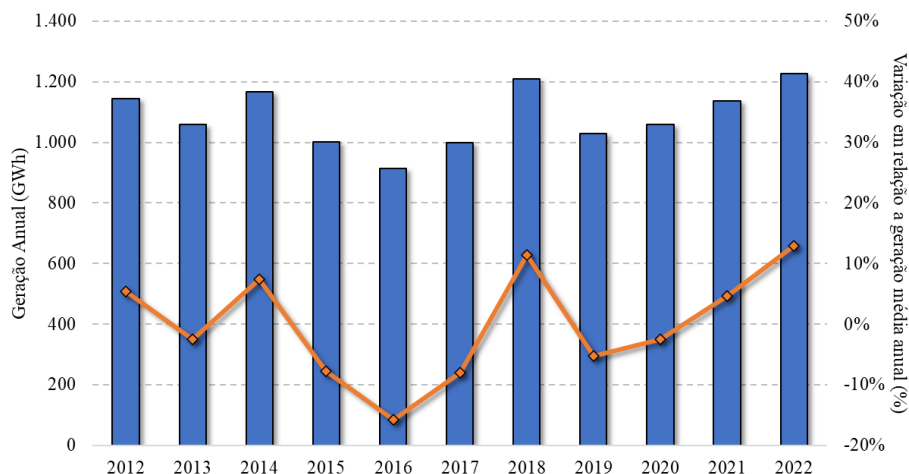


Figura 3 – Geração anual da UHE Boa Esperança (2012 – 2022).

2.3. Definição da área por dados de Cota (m) x Área (km²) x Volume (hm³)

Para essa análise são utilizados os dados de Cota (m), Vazão (m³/s) e Volume útil (%) (CAV) do reservatório da UHE Boa Esperança no período 2012-2022. Deste modo, há condições de se observar a área disponível para instalação da planta FVF, utilizando como fonte de pesquisa os registros históricos fornecidos pela ANA (2023). Na Fig. 4 são apresentados os valores em intervalos de ocorrência, o que servirá de subsídio para a escolha da cota que será utilizada para determinar a área base para o dimensionamento da planta FVF.

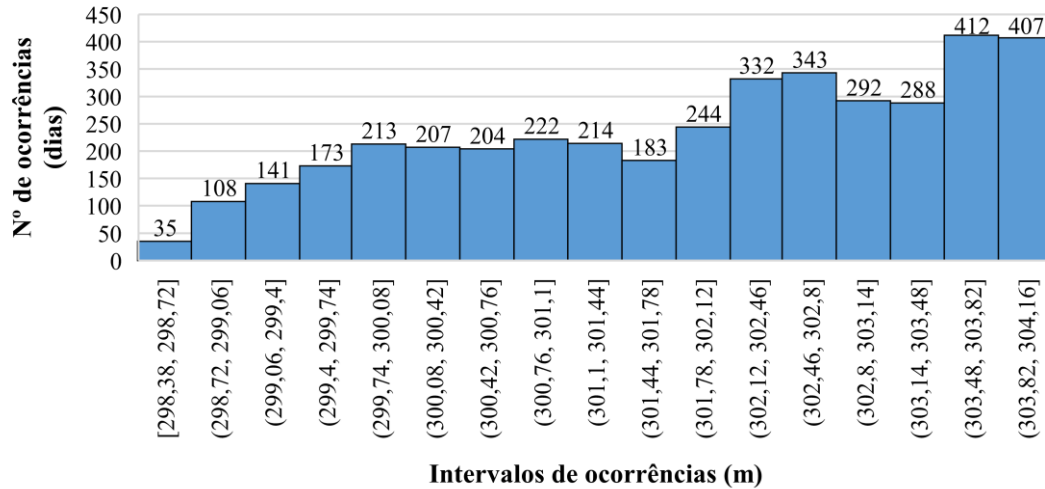


Figura 4 – Histograma da Cota.

Observando os dados apresentados na Fig. 4 é possível observar que a cota teve sua variação entre 298,38 m e 304,16 m, ao longo dos 11 anos. O histograma divide por intervalos a quantidade de vezes em que níveis de cota se repetiram. Neste sentido, é possível visualizar que a variação entre 298,38 m e 298,72 m (menores valores da série histórica em questão) foi contabilizada em 35 dias, dos quais 32 foram entre os dias 12/12/2015 e 12/01/2016, período em que o reservatório chegou a atingir 5% da sua capacidade, patamar mais baixo da história, conforme G1 (2016).

Na Fig. 5 são visualizadas as curvas CAV, na qual serão analisados os dados da sinuosidade que se refere à área, conforme Eq. (1), em que x é a cota ANA (2020).

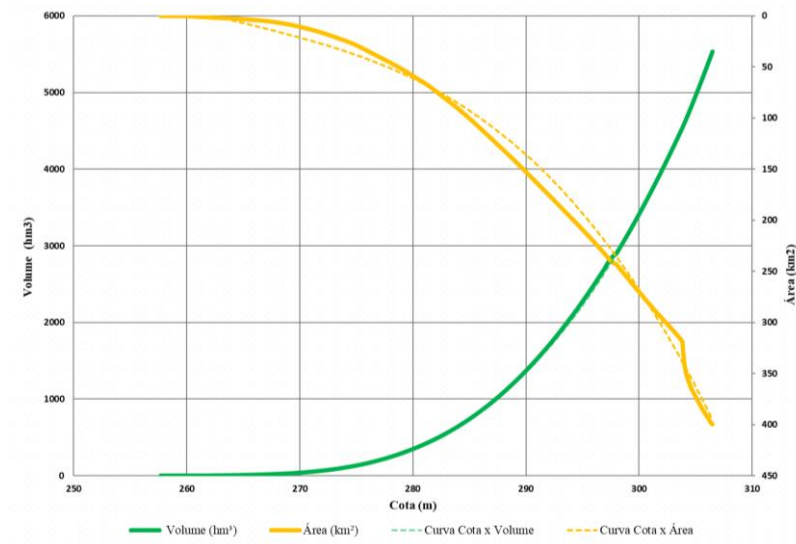


Figura 5 – Curvas Cota x Área x Volume da UHE Boa Esperança.

A equação que caracteriza a curva da área, objeto de estudo deste tópico, é:

$$\text{Área} = 0,0038237035x^3 - 3,0388564084x^2 + 807,7693510034x - 71.805,8356622626 \quad (1)$$

O valor de cota a ser adotado será 298,38 m, pois representa a medida diária mínima observada entre os anos 2012 e 2022. Apesar de este dado estar presente em um intervalo que representa apenas 0,87% do total, conforme apresentado no histograma, deve-se compreender que não foi feito um adequado estudo de batimetria do local, o qual auxiliaria na definição da área ideal para esta instalação. Portanto, ao escolher a cotação mínima, optou-se pela máxima segurança para instalação da planta FVF. Ao analisar o valor de cota correspondente ao definido anteriormente, pode-se definir a área a ser utilizada como 248,30 km². Todavia, de acordo com Strangueto (2016), 34% da área total definida para instalação da usina FVF deve ser destinada ao espaçamento entre os flutuadores, devido à zona reservada para movimentação dos técnicos.

2.4. Formulação matemática da capacidade instalada

Com a finalidade de calcular o número de módulos e a potência da planta FVF, tendo em mãos o valor da área útil de instalação do sistema FV (A_{FVF}) deve-se definir o módulo que será utilizado no projeto. Diante disto, tendo em vista a disponibilidade no mercado para fins de instalações em usinas de grande porte e as condições de instalação, adotou-se, para o primeiro caso, um módulo mais tradicional: um módulo de 480Wp de potência nominal e área do módulo (A_{mod1}) igual a 2,16 m², aproximadamente. Para o segundo caso, adotou-se um módulo PERC de 665 Wp de potência e área do módulo (A_{mod2}) igual a 3,11 m², aproximadamente. Esta escolha se deu porque este módulo é considerado um produto “top de linha”, o qual garantirá à usina um dimensionamento atualizado em relação à disponibilidade do mercado por muitos anos.

Por fim, a geração de eletricidade pode ser determinada utilizando o valor de Fator de Capacidade (FC) para o dimensionamento dos sistemas propostos, o qual é igual a 22%. Este valor representa a média aproximada dos valores observados para as usinas solares do SIN no estado do Piauí no período de 2012 – 2022 (ONS, 2023a).

3. DIMENSIONAMENTO DA USINA FVF

Com base nas informações apresentadas, a presente seção tem em vista o dimensionamento do sistema FVF considerando três cenários de ocupação da área delimitada. O cenário 1 corresponde ao preenchimento de 1% da área útil, enquanto os outros dois cenários observam a 5% e 10% dela.

3.1. Apresentação e descrição das equações utilizadas

Para o cálculo da potência instalada (P_{inst}) é necessária a definição da quantidade de módulos a serem utilizados, de acordo com a Eq. (2). Nesta equação, “x” representa o valor percentual de ocupação de acordo com cada cenário e a área dos módulos FV são as apresentadas no capítulo anterior. A_{FVF} , por sua vez, representa a área útil de acordo com as condições definidas por ANA (2020), a qual foi definida como 163,88 km². As perdas gerais do sistema FVF não estão sendo consideradas, devido à dificuldade de mensurá-las e ao fato de se tratar de um tipo de sistema recente no mercado, o qual não possui muitos estudos a este respeito.

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{A_{FVF} \times x(\%)}{A_{mod}} \quad (2)$$

A Eq. (3), utilizando-se do resultado em (2) e da potência de um módulo FV, irá definir a P_{inst} para todos os cenários.

$$P_{inst} = N^{\circ} \text{ de módulos} \times Pot_{mod} \quad (3)$$

Na Eq. (4) a estimativa de geração anual é calculada através da potência instalada do sistema e do FC adotado, além do valor 8760, o qual corresponde ao número de horas em um ano.

$$E_{ano} = F.C \times P_{inst} \times 8760 \quad (4)$$

3.2. Resultados obtidos

Nas Tab. 1 e 2 são apresentados os dados obtidos para os cenários calculados, os quais possuem 163,88 km² de área útil para os cálculos percentuais de uso do corpo d’água.

Tabela 1 – Resumo dos resultados para a usina FVF com módulos de 480 Wp.

Cenário	Percentual de área utilizado (%)	Nº de módulos	P _{inst} (MWp)	Produção anual de energia elétrica (GWh)
1	1	758.703	364,18	701,84
2	5	3.793.518	1.820,89	3.509,22
3	10	7.587.037	3.641,78	7.018,43

Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 – Resumo dos resultados para a usina FVF com módulos de 665Wp.

Cenário	Percentual de área utilizado (%)	Nº de módulos	P _{inst} (MWp)	Produção anual de energia elétrica (GWh)
1	1	526.945	350,42	675,33
2	5	2.634.726	1.752,09	3.376,63
3	10	5.269.453	3.504,19	6.753,27

Fonte: Próprio autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na presente seção são analisados os dados obtidos no dimensionamento realizado para os diferentes cenários de construção da usina FVF, levando-se em consideração a utilização de dois tipos de módulos FV diferentes. Para fins de medição da real capacidade das plantas projetadas são feitos comparativos entre as potências instaladas destas e da UHE de Boa Esperança. Além disso, são feitas análises do impacto dos variados cenários no que concerne a diferentes aspectos do setor elétrico no Brasil, no Nordeste, no Ceará e no Piauí.

4.1. Comparativo com os dados da UHE de Boa Esperança

A partir dos dados obtidos, pôde-se construir a Tab. 3 com os percentuais de geração anual da usina FVF, nos diferentes cenários, em comparação com o que já existe na UHE de Boa Esperança. Para esta finalidade, adotou-se o observado anteriormente, ou seja, geração anual média, para o período de 2012 a 2022, de 1.086,34 GWh.

Tabela 3 – Comparação das gerações anuais da FVF e da UHE de Boa Esperança.

Cenários	% de Área ocupada (A _{fvf})	Geração anual FVF (GWh)	% da Geração anual média da UHE (2012-2022)
1.1	1%	701,84	64,61%
2.1	1%	675,33	62,17%
1.2	5%	3.509,22	323,03%
2.2	5%	3.376,63	310,83%
1.3	10%	7.018,43	646,06%
2.3	10%	6.753,27	621,65%

Fonte: Próprio autor.

Fica notória a diferença entre as características de produção FVF e hidráulica. Enquanto a capacidade instalada das usinas FVF projetadas foram maiores em todos os cenários, a geração hidráulica média anual é maior que a solar em dois dos seis cenários propostos. Isto ocorre devido ao caráter intermitente da geração FV, o que torna o FC desta bem menor que o de uma fonte hídrica.

O Anexo PNE 2050, elaborado pela EPE, considerou, para as simulações de expansão de UHEs, um FC médio de 55% (MME, 2020). Em contrapartida, o FC médio considerado para este projeto de usina FVF foi de 22%, conforme explicação enunciada no capítulo de metodologia.

Além disso, é importante ressaltar que as perdas do sistema FVF não estão sendo consideradas, o que indica que a geração real será menor que a exposta neste e nos outros exemplos desta seção. No entanto, estes valores de geração propostos são capazes de fornecer uma boa ideia do potencial da planta em questão.

4.2. Análise considerando o histórico de geração de eletricidade do País

Na Tab. 4 são apresentados os dados de geração anual, em GWh, das usinas FVF propostas e do Brasil, considerando o valor exposto anteriormente e no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023, desenvolvido pela EPE. Este relatório está em formato de *dashboard*, o que possibilita o *download* dos dados e análises mais criteriosas (MME, 2023).

Em 2022, o Brasil produziu 677.436,87 GWh de energia elétrica, considerando todas as fontes de geração, o que representa o maior índice da série histórica de 2013 a 2022. O Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023 indica que a produção por plantas FV cresceu em 79,8% de 2021 para 2022, enquanto fontes não-renováveis, como petróleo e carvão, reduziram em 57,2% e 54,6%, respectivamente (MME, 2023).

Os dados supracitados indicam a tendência de investimento em sistemas FV no País. Corroborando com este cenário, a usina FVF proposta, para o cenário de uso de apenas 10% da área definida anteriormente, representa 1% da geração de energia elétrica do País, considerando todas as fontes de produção em 2022. Tal fato incorre na ideia de que a planta em questão auxiliaria na tendência de crescimento da produção FV no território nacional e no suprimento das diversas necessidades da Nação.

Tabela 4 – Comparação das gerações anuais da usina FVF e do Brasil.

Cenários	% de Área ocupada (A _{fvf})	Geração anual FVF (GWh)	% da Geração anual do Brasil (2022)
1.1	1%	701,84	0,10%
2.1	1%	675,33	0,10%
1.2	5%	3.509,22	0,52%
2.2	5%	3.376,63	0,50%
1.3	10%	7.018,43	1,04%
2.3	10%	6.753,27	1,00%

Fonte: Próprio autor.

4.3. Comparativo com dados do Piauí

Considerando que a represa da UHE em questão está localizada no estado do Piauí e a instalação de uma planta FVF neste local beneficiaria não só esta Unidade Federativa (UF), mas também todas as regiões interligadas ao SIN, entende-se que é pertinente analisar o impacto desta possível geração no consumo de energia elétrica deste Estado.

Na Tab. 5 são apresentados os dados de geração anual, para as usinas FVF propostas, e os números de consumo anual do Piauí, ambos em GWh, considerando os dados anteriormente e no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023 da EPE, respectivamente (MME, 2023).

Tabela 5 – Comparação da geração anual da usina FVF e do consumo do Piauí.

Cenários	% de Área ocupada (A _{fvf})	Geração anual FVF (GWh)	% do consumo anual do Piauí (2022)
1.1	1%	701,84	17,56%
2.1	1%	675,33	16,90%
1.2	5%	3.509,22	87,82%
2.2	5%	3.376,63	84,50%
1.3	10%	7.018,43	175,64%
2.3	10%	6.753,27	169,01%

Fonte: Próprio autor.

Em 2022, o Piauí consumiu 3.995,90 GWh. Desta forma, ao fazer o confronto entre os dados obtidos no dimensionamento e este valor, tem-se que as usinas propostas podem suprir de 16,90% a 175,64% da demanda de eletricidade, a depender do cenário escolhido. Vale ressaltar que o máximo valor de A_{fvf} considerado foi de 10% e que se trata apenas de uma planta FVF analisada diante da necessidade de energia elétrica geral do Estado em questão.

Além disso, é notável que a utilização de, aproximadamente, 8,19 km² de área do corpo d'água disponível já é capaz de suprir quase 90% da demanda de energia elétrica desta UF, o que demonstra o potencial de geração da usina FVF.

4.4. Comparativo com dados do Ceará

Ainda considerando o impacto deste tipo de instalação no SIN e sabendo que o estudo em questão está sendo feito no Ceará e plantas FVF podem ser implantadas em muitos dos corpos d'água deste Estado, conforme apresentado em Galdino e Oliviere (2016) e Lima *et al.* (2023), entende-se que é pertinente analisar o impacto desta possível geração no consumo de energia elétrica deste.

Na Tab. 6 são apresentados os dados de consumo anual, em GWh, das usinas FVF propostas e do Ceará, considerando os dados anteriormente e no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023 da EPE, respectivamente (MME, 2023).

Tabela 6 – Comparação da geração anual da usina FVF e do consumo do Ceará.

Cenários	% de Área ocupada (A _{FVF})	Geração anual FVF (GWh)	% do consumo anual do Ceará (2021)
1.1	1%	701,84	5,32%
2.1	1%	675,33	5,12%
1.2	5%	3.509,22	26,58%
2.2	5%	3.376,63	25,58%
1.3	10%	7.018,43	53,17%
2.3	10%	6.753,27	51,16%

Fonte: Próprio autor.

Em 2021 o Ceará consumiu 13.200,09 GWh. Desta forma, ao fazer o confronto entre os dados obtidos no dimensionamento e este valor recorde, tem-se que as usinas propostas podem suprir percentuais de energia elétrica de 5,12% a 53,17%, a depender do cenário escolhido. Vale ressaltar que o máximo valor de A_{FVF} considerado foi de 10% e que se trata apenas de uma planta FVF analisada diante da necessidade elétrica geral do Estado em questão.

Além disso, é notável que a utilização de, aproximadamente, 16,39 km² de área do corpo d'água disponível já é capaz de suprir mais de metade da demanda de energia elétrica desta UF, o que demonstra o potencial de geração da usina FVF.

4.5. Comparativo com dados de consumo comercial e industrial do Nordeste

Na Tab. 7 são apresentados os dados de geração da usina FVF para cenários propostos com a finalidade de compará-los com o consumo em 2022 de alguns setores industriais e comerciais do Nordeste. Estes foram escolhidos levando em consideração o tipo de serviço, identificado pelo número de Classificação Nacional de Atividade Econômica (CNAE), e a posição no ranking de consumo de energia elétrica comercial e industrial da região (MME, 2023).

Com relação ao consumo observado no ramo comercial, obtiveram-se os dados das empresas que estão englobadas no CNAE 46 – Comércio por atacado, exceto veículos automotores e motocicletas e no CNAE 61 – Telecomunicações. Isto se deu porque o consumo destas duas classes no ano passado foi de 1.253,14 GWh e 705,90 GWh, 2º e 6º lugares no ranking de consumo de energia elétrica para o setor comercial nordestino.

No setor industrial, por sua vez, obtiveram-se os dados do consumo das empresas que estão englobadas no CNAE 22 – Fabricação de produtos de borracha e de material plástico e no CNAE 13 – Fabricação de produtos têxteis. Isto se deu porque o consumo destas duas classes no ano passado foi de 1.624,91 GWh e 1.486,98, 5º e 6º lugares no ranking de consumo de energia elétrica para o setor industrial nordestino.

Desta forma, ao fazer o confronto entre os dados obtidos no dimensionamento e os valores supracitados, tem-se que o percentual de contribuição dos diferentes cenários varia entre 41,56% e 994,25%, conforme apresentado na Tab. 7.

A fabricação de produtos têxteis, por exemplo, é considerada uma atividade industrial muito importante no Nordeste brasileiro, a qual auxilia no emprego de diversas famílias desde que estas empresas foram abertas na região. A usina proposta, sob as condições de uso de 5% de A_{FVF} e instalação com módulos de 480Wp, já consolidados no mercado, é capaz de gerar o equivalente a 236% da necessidade de energia elétrica deste setor. Isto posto, constatam-se os benefícios às indústrias em questão, trazendo margem para expansão de maquinários e outros favorecimentos não só aos industriais, mas às diversas famílias.

Tabela 7 – Comparação da geração anual da usina FVF e do consumo de setores comerciais e industriais do Nordeste.

Cenários	% de Área ocupada (A _{FVF})	Geração anual FVF (GWh)	% do consumo CNAE 46	% do consumo CNAE 61	% do consumo CNAE 22	% do consumo CNAE 13
1.1	1%	701,84	56,01%	99,42%	43,19%	47,20%
2.1	1%	675,33	53,89%	95,67%	41,56%	45,42%
1.2	5%	3.509,22	280,03%	497,13%	215,96%	236,00%
2.2	5%	3.376,63	269,45%	478,34%	207,80%	227,08%
1.3	10%	7.018,43	560,07%	994,25%	431,93%	471,99%
2.3	10%	6.753,27	538,91%	956,69%	415,61%	454,16%

Fonte: Próprio autor.

5. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho consiste em propor, mediante o levantamento de dados do ONS, da CHESF, do SIN e da EPE, seis cenários de implementação de plantas FVF no reservatório da UHE de Boa Esperança. Estes são divididos em dois casos diferentes, o primeiro em que a construção da usina se dá com o uso de módulos FV de 480Wp, já consolidados no mercado, e o segundo com módulos de 665 Wp, mais recentes no meio comercial brasileiro.

A apresentação de diversos artigos desenvolvidos nesta área revela a ausência de estudos aprofundados a respeito desta temática, pois todos deixam margens para diversos estudos posteriores, estimulando o crescimento de pesquisas a respeito deste tipo de sistema FV.

Neste sentido, a metodologia busca apresentar diversos dados de geração da UHE localizada no Piauí, a qual possui uma capacidade instalada de 237,3 MW, proveniente da associação de turbinas do tipo Francis, sendo duas de 55 MW e duas de 63,65 MW. O reservatório desta usina tem 352,2 km² de área, no entanto, em decorrência dos dados fornecidos pela ANA e associando-os à curva CAV, observa-se que é necessário ter como área base para este estudo 248,30 km². Isto posto, é possível definir os três cenários de cada caso com áreas de 1,64 km², 8,19 km² e 16,39 km², os quais correspondem a 1%, 5% e 10% da área útil do corpo d'água.

Após o dimensionamento deste sistema, e o encontro dos valores equivalentes às capacidades instaladas e gerações anuais de cada cenário, é possível, mediante a comparação com os dados da UHE de Boa Esperança e com os números apresentados pela ABSOLAR e pela EPE nos documentos supracitados, estimar o potencial das usinas FVF propostas.

Observa-se que a geração de energia elétrica da usina FVF dos cenários 1.2 e 2.2, os quais correspondem à utilização de uma área de 5% de Afvf, é o triplo da produção elétrica média anual da UHE da CHESF, considerando os valores levantados para os anos de 2012 a 2022. Com relação aos dados a nível nacional, é notório que a usina proposta, utilizando 10% da área útil, é capaz de produzir o equivalente a 1% da geração de energia elétrica brasileira, considerando todas as fontes.

Além disso, a construção dos cenários 1.3 e 2.3, cuja área utilizada corresponde a 10% de Afvf, é capaz de o equivalente a valores em torno de 170% e 51% do consumo anual do Piauí e do Ceará, respectivamente, considerando os anos de máxima demanda para cada um na série histórica de 2013 a 2022. Ademais, a geração elétrica das usinas FVF propostas é capaz de suprir a demanda de diversos ramos industriais da região Nordeste. O cenário 1.1, o que corresponde a 1% de Afvf, por exemplo, cuja geração anual estimada é de 701,84 GWh, é capaz de produzir o equivalente a 56,01%, 99,42%, 43,19% e 47,20% da demanda de energia elétrica das empresas do Nordeste englobadas nos CNAEs 46, 61, 22 e 13, respectivamente.

Por fim, é notório que tais informações atestam o potencial energético deste tipo de construção e o impacto a nível regional, estadual e nacional, podendo suprir diversas necessidades dos mais diferentes contextos, trazendo a possibilidade de contribuição na segurança energética e no desenvolvimento tecnológico-financeiro.

Agradecimentos

O segundo autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 pela bolsa de doutorado. O terceiro autor agradece à Secretaria de Infraestrutura (SEINFRA) pela parceria no programa Cientista Chefe em Energia. O quarto autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade em pesquisa

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Infográfico ABSOLAR, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acessado em: 30 out. 2023.
- ABSOLAR. Solar flutuante deverá ter projetos hibridizados a partir de 2024. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/solar-flutuante-devera-ter-projetos-hibridizados-a-partir-de-2024/>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- Agência Nacional de Águas - ANA. Catálogo de Metadados da ANA. Cota x Área x Volume dos Reservatórios de Usinas Hidrelétricas. 2020. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b8f0487a-df73-4f8d-8b22-bb49cf9f3683>.
- Agência Nacional de Águas - ANA. SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios. Disponível em <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin?dropDownListEstados=19&dropDownListReservatorios=19127&dataInicial=01%2F01%2F2012&dataFinal=31%2F12%2F2022&button=Buscar>.
- Borges, F. Q. Crise de Energia Elétrica no Brasil - Uma Breve Reflexão Sobre a Dinâmica de Suas Origens e Resultados. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218, [S. l.], v. 2, n. 10, p. e210809, 2021. DOI: 10.47820/recima21.v2i10.809. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/809>.
- Ministério de Minas e Energia – MME (Brasil). Empresa de Pesquisa Energética – EPE. 2023 Statistical Yearbook of Electricity: 2022 baseline year. Brasília, 2023. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro-eng/#Presentation>.
- Ministério de Minas e Energia – MME (Brasil). Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME/EPE, 2020.
- Canal Solar. Mercado global de energia solar flutuante pode dobrar até 2031: Wood Mackenzie indica que ao menos 15 países devem ultrapassar 500 mw em instalações nos próximos anos. Wood Mackenzie indica que ao menos 15 países devem ultrapassar 500 MW em instalações nos próximos anos. 2023. Disponível em: https://canalsolar.com.br/mercado-global-de-energia-solar-flutuante-pode-dobrar-ate-2031/?utm_campaign=boletim_diario_29052023&utm_medium=email&utm_source=RD+Station.

- CHESF. Sistema CHESF: Boa Esperança. Recife, 2023. Disponível em: <https://www.chesf.com.br/sistemachesf/pages/sistemageracao/boaesperanca.aspx>.
- G1. Barragem de Boa Esperança atinge 68,3% de seu volume total, diz Chesf. 2016. Disponível em: <https://g1.globo.com/pi/piaui/noticia/2016/02/barragem-de-boa-esperanca-atinge-683-de-seu-volume-total-diz-chesf.html>.
- Galdino, Marcos A. E.; Olivieri, Marta M. de A. Considerações sobre a implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes no Brasil. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1807/1797>
- Googlemaps. Boa Esperança Hydroelectric Power Plant. 2023. Disponível em: <https://www.google.com/maps/place/Boa+Esperan%C3%A7a+Hydroelectric+Power+Plant/@-6.7854287,-43.6973871,11z/data=!4m6!3m5!1s0x783f6ac60385c21:0xe247bfcf8e566342!8m2!3d-6.7491409!4d-43.5661091!16s%2Fm%2F04g18x2?entry=ttu>.
- Lima, Raoni A. de. *et al.* Impacto da geração de plantas fotovoltaicas flutuantes sobre a matriz energética de estados do semiárido brasileiro. Revista Brasileira de Energia, Volume 29, Nº 1, 1º Trimestre de 2023, Páginas 106-130. DOI: 10.47168/rbe.v29i1.778
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Geração e Fator de Capacidade Médios Mensais. 2023a. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-fator-capacidade-medios-mensais.aspx>.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Histórico da operação. 2023b. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. O Sistema em números. 2023c. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.
- PV Magazine. World's largest floating PV plant goes online in China. 2022. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2022/01/03/worlds-largest-floating-pv-plant-goes-online-in-china/>.
- Sahu, A.; Yadav, N.; Sudhakar, K. Floating photovoltaic power plant: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 66, 2016, Pages 815-824, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051>.
- SolarPower Europe. Global Market Outlook: for solar power 2022 - 2026. For Solar Power 2022 - 2026. 2022. Disponível em: https://api.solarpowereurope.org/uploads/Solar_Power_Europe_Global_Market_Outlook_report_2022_2022_V2_2_87bd2c1e44.pdf.
- Strangueto, k. Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Energia Elétrica através de Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes em Reservatórios de Hidrelétricas. Tese (Planejamento de Sistemas Energéticos) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. 147 f.
- World Bank Group, ESMAP and SERIS. 2019. Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report. Washington, DC: World Bank.
- Zambon, R. C. A operação dos reservatórios e o planejamento da operação hidrotérmica do Sistema Interligado Nacional. Revista USP, [S. l.], n. 104, p. 133-144, 2015. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i104p133-144. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/106762>.

GENERATION POTENTIAL OF A FLOATING PHOTOVOLTAIC PLANT AT THE “BOA ESPERANÇA – PI” HYDROELECTRIC DAM

Abstract. *This article has the objective of identify the generation potential for a FPV plant installed on Boa Esperança hydropower dam, with a useful area of 248.30 km². Through data from the UHE in question, which are available on the websites of the Operador Nacional do Sistema (ONS) and the Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), comparisons are made with the results obtained for the FPV plants. Six scenarios are proposed, in which the first three refer to installations with 480 Wp photovoltaic (PV) modules and the others are related to 665 Wp modules. The three scenarios for each case are defined for areas of 1.64 km², 8.19 km² and 16.39 km², which correspond to 1%, 5% and 10% of the useful area of the water body, considering the percentage intended for spacing between modules for moving technicians. The installed capacity of the scenarios varies between 350.42 MWp and 3,641.78 MWp and the annual generation varies between 675.33 GWh and 7,018.43 GWh. These values are compared with data obtained from Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), CHESF and ONS, and analyzes are made of the impact of different scenarios about distinct aspects of the electricity sector in Brazil, in the Northeast, in Ceará and Piauí.*

Keywords: Solar-photovoltaic, Floating Photovoltaic, Hydropower plant