

METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS FLUTUANTES EM LAGOS URBANOS E RESERVATÓRIOS

Breno Bezerra Freitas¹
Caio Ramos de Menezes¹
Cinthya Martins Felix¹
Daniel Rebouças Jaguaribe¹
Dionízio Porfírio de Assis¹
Francisco Elmo Lima Uchoa Filho¹
Gabriel Henrique Mesquita Pinheiro¹
João Paulo Dias Liberato¹
Karol Damasceno Cysne¹
Kennedy Romualdo Guedes Coimbra¹
Marcelo Rocha Braga¹
Otacilio José de Macedo Nunes¹
Paulo Cesar Marques de Carvalho¹

¹*Universidade Federal do Ceará*

DOI: 10.47168/rbe.v30i1.840

RESUMO

Os sistemas fotovoltaicos flutuantes (FVF) em espelhos d'água tem sido cada vez mais utilizadas nos últimos anos. O uso de plantas FVF oferece vantagens, como a instalação em superfícies que normalmente não seriam utilizadas para a produção de eletricidade de forma convencional. Além disso, a evaporação da água pode ser reduzida e a eficiência da conversão FV aumenta devido ao arrefecimento dos módulos. Assim, no presente artigo é analisada a utilização de plantas FVF a nível global e proposta uma metodologia de dimensionamento de centrais FVF em lagos e reservatórios urbanos. Como aplicação da metodologia proposta são selecionados corpos d'água adequados na cidade de Fortaleza, considerando as restrições ambientais e regulatórias associadas; sequencialmente, é avaliada a geração esperada com o uso de módulos de 330 Wp, gerando anualmente 65,4 GWh; esta produção significa 1,4% do consumo anual de eletricidade da cidade em 2021 e 496,7% do consumo das escolas do município em 2023.

Palavras-chave: Fotovoltaica flutuante; Lagos urbanos; Reservatórios urbanos.

ABSTRACT

Floating Photovoltaic (FPV) plants on water bodies surfaces have increasingly been used in recent years. The adoption of FPV plants offers advantages, such as the installation on surfaces that wouldn't normally be used for conventional power generation. Additionally, water evaporation can be reduced, and PV efficiency increases due to the modules cooling. Hence, in the present paper we analyze the use of FPV technology, globally, and propose a sizing methodology of FPV plants in urban lakes and reservoirs. As an application of the proposed methodology, suitable water bodies are elected in the city of Fortaleza, considering the associated environmental and regulatory restrictions; sequentially, the expected generation is evaluated with the use of 330 Wp modules, generating 65.4 GWh per year; this production corresponds to 1.4% of the city total demand in 2021 and 496.7% of the demand of the municipality schools in 2023.

Keywords: Floating photovoltaics; Urban lakes; Urban reservoir.

1. INTRODUÇÃO

Na atual conjuntura, há necessidade de redução das emissões associadas ao uso de combustíveis fósseis, sendo o setor elétrico um dos principais agentes para essa mudança, principalmente com o uso de fontes renováveis (ARAUJO et al., 2020). Nos últimos anos tem crescido o uso de plantas Fotovoltaicas Flutuantes (FVF), que oferecem vantagens em comparação às plantas Fotovoltaicas (FV) em solo (BUSSON et al., 2021). Além de evitar a competição com o uso de terra para fins agrícolas, a utilização de plantas FVF pode aumentar a eficiência de conversão de energia, em função da redução da temperatura dos módulos, e reduzir as perdas do reservatório por evaporação, aspecto que pode ser benéfico para usinas hidrelétricas em uma utilização conjunta (TEMIZ e JAVANI, 2020), (CRUZ et al., 2022).

Por outro lado, devido à característica flutuante dos projetos, há uma grande dependência das plantas FVF em relação à perenidade do espelho d'água em uso. Importante lembrar que uma significativa cobertura da superfície d'água disponível pode incorrer em graves impactos ao bioma local, o que limita a área útil a uma pequena fração (SILVA e BRANCO, 2018). Desta forma, é comum que projetos FVF ocupem pequenas áreas, afastadas das margens, para que se garanta a superfície de flutuação estável mesmo em períodos de redução do volume d'água.

A região litorânea do Ceará, na qual se situa a cidade de Fortaleza, é classificada pela Fundação Cearense de Meteorologia e

Recursos Hídricos (FUNCEME) como de clima “Subúmido/Úmido” (FUNCEME, 2023). Além disso, a região está entre as de maior precipitação média anual do estado (DRUZ et al, 2019). Atualmente a prefeitura de Fortaleza busca investir na tecnologia FV (PMF, 2022) e, diante da grande densidade populacional da cidade, a estratégia de geração FVF, que faz uso de áreas urbanas alheias à disputa territorial demográfica, ganha destaque. Fortaleza, capital do Ceará, possui cerca de 2,4 milhões de habitantes e uma área territorial de 312 km², com uma densidade demográfica de 7.775 habitantes/km², tornando-a a oitava cidade com maior densidade demográfica do Brasil (IBGE, 2022). Conforme dados fornecidos pelo Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE), o consumo de energia elétrica da cidade no ano de 2021 foi de aproximadamente 4,74 TWh (IPECE, 2021), apontando para um consumo per capita anual de cerca de 2,0 MWh/habitante.

Diversos estudos geológicos sobre Fortaleza ressaltam a porosidade do solo, seguido de um subsolo cristalino de baixa permeabilidade, o que caracteriza uma grande capacidade de retenção da água proveniente da estação chuvosa (GOMES, 2008). A água nas regiões mais baixas emerge em lagoas que são mantidas por longos períodos pela água armazenada no solo. Não existem estudos sobre cada espelho d’água da cidade para definição dos mais propícios à instalação de plantas FVF; porém, os dados existentes são considerados suficientes para que se avalie como satisfatória a perenidade de todos os grandes espelhos d’água da capital (GOMES, 2008).

Para além disso, devido aos sistemas FVF serem muito recentes no contexto do Brasil, como um todo, fatores como ancoragem, flutuadores e conexões à rede elétrica ainda são escassos, fato que dificulta a análise dos impactos das diferentes tecnologias até mesmo em sistemas FVF já instalados. Outro fator incluso é que a manufatura dos módulos FVF não é feita no Brasil, e isto inclui os ajustes para o melhor desempenho dos módulos sob as condições nacionais de um país com território de dimensões continentais.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo propor uma metodologia de dimensionamento de plantas FVF urbanas, utilizando-se a cidade de Fortaleza como estudo de caso. Após a introdução, o estado da arte das aplicações de FVF, sob a ótica brasileira e mundial, é apresentado no tópico dois. No terceiro tópico, as etapas metodológicas propostas para a seleção e caracterização de espelhos d’água urbanos são relacionadas; no quarto tópico, o potencial de geração FVF para Fortaleza é estimado, seguido das conclusões no quinto tópico.

2. ESTADO DA ARTE

A presente seção tem como objetivo mostrar um panorama atual dos estudos sobre geração FVF no Brasil e no mundo, procurando evidenciar o que já foi realizado e o que pode ser feito para o desenvolvimento desta tecnologia de geração.

2.1 Análise Bibliométrica da FVF

A produção científica sobre FVF é analisada visando contextualizar o atual cenário da tecnologia. Por meio da utilização da Application Programming Interface (API) de pesquisa da base de dados SCOPUS, é possível a realização de uma análise bibliométrica dos artigos produzidos mundialmente sobre FVF, entre os anos de 2010 e 2022, mostrada na Figura 1.

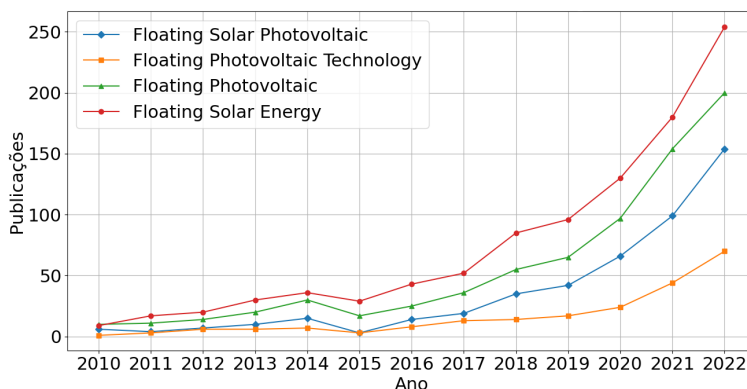


Figura 1 – Evolução da publicação de documentos na base SCOPUS

Diferentes combinações de palavras-chave dos artigos e resumos são utilizadas para pesquisa por título, de modo a permitir uma análise mais específica do âmbito científico acerca do tema, com os termos pesquisados em inglês. O tema está em crescente investigação em qualquer das quatro configurações apresentadas na Figura 1, algumas partindo de um pouco menos de 10 publicações no ano 2010 para centenas de resultados em 2022. Para o termo *floating photovoltaics*, por exemplo, há um crescimento total de 1900% na publicação de artigos, começando com apenas 10 publicações no ano de 2010 para 200 em 2022. Esse crescimento aparenta ser mais notável a partir do ano de 2015, evidenciando um interesse no tópico.

2.2 FVF no Mundo

Segundo dados de 2022, o mercado FVF é de 1,6 GW globalmente, com previsão que crescerá a uma taxa anual de 33,7% até 2026, atingindo 4,8 GW (PV MAGAZINE, 2022). Inúmeros artigos têm focado em plantas FVF nos últimos anos; na presente seção são apresentados artigos representativos nos temas de resfriamento dos módulos, uso em lagos urbanos e redução de evaporação em reservatórios. Apesar do investimento inicial de uma usina FVF ser mais elevado em comparação a uma planta FV sobre o solo, estudos vêm sendo realizados para evidenciar as vantagens da FVF. Com a finalidade de ilustrar os benefícios da utilização de FVF na Índia, um estudo cita um aumento de 2,5% a 3% de eficiência dos módulos em comparação com a planta FV sobre o solo (SIECKER et al, 2017). Por consequência do contato contínuo com a água, é possível manter os módulos em baixa temperatura e, assim, mitigar as perdas térmicas. Adicionalmente, há uma economia anual de água por evaporação de 191 milhões de litros; como conclusão, para uma potência de 1 MWp, a tecnologia FVF é superior à FV sobre o solo.

No Paquistão estão sendo realizados estudos referentes à implantação de FVF em pequenos lagos (HAFEEZ et al., 2022). Uma estimativa do potencial de implantação de um sistema FVF em um lago urbano é proposto e comparado seu desempenho, custo e retorno financeiro com o de uma planta FV sobre o solo, por meio do simulador *System Advisor Model* (SAM). Como conclusão, o Valor Presente Líquido (VPL) é positivo para FVF, o que não ocorre para a planta FV sobre o solo.

Segundo um estudo de caso no Egito, é possível aumentar a potência de duas hidrelétricas localizadas nas barragens de High Adam e Aswan Reservoir, com potência total de 2,5 GW (RAVICHANDRAN et al., 2021). A simulação realizada com o programa Helioscape propõe adição de 5 MW de FVF em cada uma das barragens. Os resultados demonstram que as instalações FVF nas barragens devem melhorar o desempenho no que se refere à redução de emissões de dióxido de carbono com o uso combinado de hidroelétricas e plantas FVF, aumento de eficiência de conversão de energia e economia de água pela redução de evaporação.

2.3 FVF no Brasil

No Brasil, os estudos têm se concentrado em análises de viabilidade e construção de cenários. Um exemplo é um estudo da possibilidade de uma usina FVF no lago Bolonha, em Belém-PA (SILVA e SOUZA, 2018), incluindo uma revisão bibliográfica e aplicação do

programa SAM. O desempenho estimado de uma planta FVF é apresentado, chegando a 112 módulos e uma produção anual de 38 MWh, aproximadamente.

A viabilidade da instalação de uma usina FVF no Rio Mossoró, em Mossoró, RN, é avaliada em (CARVALHO, 2020). Inicialmente, a irradiância solar anual no local é estimada. Em seguida, é determinada a área necessária para a instalação da usina FVF, totalizando 4.767,42 m²; dessa área, 4.122,75 m² são cobertos pelos módulos. O estudo considera a utilização de 2.000 módulos de 405 Wp, com uma eficiência de 19,65%, prevendo uma geração aproximada de 10.800 kWh/mês. Caso o sistema fosse realmente instalado, seria capaz de fornecer energia suficiente para atender às necessidades de mais de 700 residências.

Um estudo avalia a viabilidade da instalação de um sistema FVF no lago do campus da Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais (LOPES E SOUZA JÚNIOR, 2016). A partir da área total do lago de 9.119 m², são utilizadas apenas as áreas planas e sem curvas nas margens, resultando em uma área de 3.030 m², considerando uma distância de um metro em relação às margens. Os pesquisadores concluem que é possível instalar uma capacidade de 206 kW, utilizando 792 módulos de 260 Wp, com eficiência de 16,5%.

A primeira etapa da usina FVF na barragem de Sobradinho (BA) é analisada em (RODRIGUES et al, 2020), comentando sua viabilidade, impactos ambientais e energéticos, e complementaridade entre a geração FVF e hidrelétrica. A produção anual média simulada pelo programa PVSyst é de 1.654 MWh, o que indica uma grande vantagem na implementação da tecnologia FVF em conjunto com hidrelétricas, de modo a otimizar a utilização da área do lago para geração elétrica e da infraestrutura da subestação.

Uma metodologia de dimensionamento de FVF para barragens de regiões semiáridas é proposta em (REGES et al., 2020). Propõe-se a utilização da curva de duração da inundação dos reservatórios e a escolha dos níveis de confiabilidade baixa e alta de 70% e 90%, respectivamente. Considerando os dois cenários, mensura-se que as barragens avaliadas para o estado do Ceará podem gerar anualmente, no total, entre 5.579 e 14.005 GWh de eletricidade, além de reduzirem de 7,42% a 19,08% as perdas por evaporação.

É analisado em (SACRAMENTO et al., 2015) a possibilidade de instalação de uma planta FVF em três reservatórios na região do semiárido brasileiro – Castanhão, Orós e Banabuiú. No estudo, em comparação com as instalações em solo, foi medido um aumento médio de 12,5% na eficiência da conversão para módulos flutuantes nas condições climáticas locais. Quanto à eficiência, um estudo avalia a redução de temperatura nos módulos FVF a partir da proposição de

arrefecimento passivo com o uso de pontes de calor em contato com água (BUSSON et al, 2021). Os testes realizados em Fortaleza, Ceará, evidenciam ganhos de 26,1% em eficiência e redução de 3,2°C na temperatura dos módulos ao comparar um módulo FVF com um módulo convencional sobre o solo.

3. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS FVF EM ÁREAS URBANAS

A definição do potencial de geração FVF em áreas urbanas requer, inicialmente, a seleção dos espelhos d'água aptos a hospedar os módulos FV a serem instalados. Para tanto, são estudados os dados hídricos provenientes de diferentes referências e estabelecidos critérios de seleção. Os fatores que podem influenciar na disponibilidade dos espelhos também devem ser considerados. Posteriormente, são estabelecidos os critérios de seleção de módulos FV e definidos os modelos de referência para as estimativas.

Os dados hidrográficos são, usualmente, disponibilizados abertamente por órgãos governamentais das esferas municipal, estadual e federal. Conforme a metodologia proposta, fazem-se necessárias tanto avaliações geométricas dos espelhos d'água, em especial suas áreas, como aspectos qualitativos, como tipo de espelho (rio, alagado, lagoa, açude) e seus respectivos nomes. Desta forma, são considerados os dados fornecidos em formato *shape file*, comumente utilizados em programas de georreferenciamento, que contêm projeções poligonais dos espelhos, posicionadas em suas correspondentes coordenadas geográficas e associadas individualmente a diversas informações pertinentes, como apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Exemplo de poligonal selecionada do espelho d'água

Inicialmente, devem ser buscados e analisados dados municipais e estaduais; em seguida os dados nacionais disponibilizados pela

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), mediante acesso à sua plataforma digital de dados abertos (ANA, 2020). O estudo requer que, para além do formato de arquivo, os dados utilizados apresentem polígonos independentes para cada espelho d'água associado a metadados relevantes, de modo a viabilizar tanto a filtragem dos dados como a sua identificação individual. Para acessar os dados dos arquivos em *shape file*, filtrá-los e traduzir os resultados em imagens é utilizado o programa de código aberto QGIS (QGIS, 2023). QGIS permite sobrepor polígonos geolocalizados de diversas fontes de dados, possibilitando uma visualização comparada de todos os dados obtidos.

A escolha dos módulos para a planta FVF deve ser baseada em critérios técnicos, econômicos e financeiros; se possível, deve ser observada a experiência do fabricante com plantas flutuantes. Além disso, em qualquer projeto FV os módulos devem seguir algumas diretrizes, como a disponibilidade no mercado nacional e a autenticação dos parâmetros técnicos pelo órgão responsável (CARVALHO, 2020). Atualmente, há diversos fabricantes e modelos de módulos FV disponíveis no mercado, sendo que a maioria deles obedece às orientações referidas. Em 2022 foram identificados 51 fornecedores de módulos FV no mercado nacional.

O passo seguinte é o dimensionamento da planta FVF com ocupação de um percentual escolhido da área do espelho d'água; o número de módulos, e conseqüentemente a potência nominal da planta, é calculado a partir da divisão da área prevista para a planta FVF pela área individual do módulo. Neste cálculo deve ser acrescentado um percentual de 34% da área para fluxo de técnicos e eventuais manutenções (STRANGUETO, 2016). Como etapa final, é estimada a geração da planta FVF com uso do fator de capacidade de plantas FV já em operação na cidade. Apesar de eventuais diferenças de rendimento entre as duas modalidades (plantas flutuantes e convencionais), o fator de capacidade (FC) das plantas em operação fornece uma boa base para uma primeira estimativa de geração, pois considera as condições meteorológicas da cidade estudada.

Na Figura 3 é apresentado fluxograma com as principais etapas da metodologia proposta.

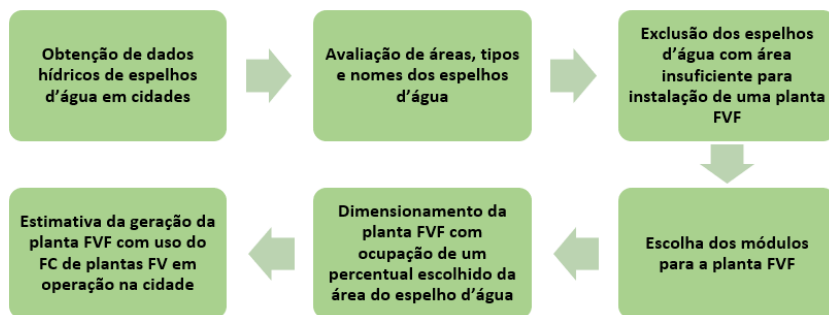


Figura 3 – Fluxograma das etapas da metodologia

4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA: ESTUDO DE CASO PARA FORTALEZA-CE

Os primeiros dados avaliados para o presente estudo de caso são os disponibilizados pelo Instituto de Planejamento de Fortaleza (IPLANFOR), mediante plataforma digital “Fortaleza em Mapas” (IPLANFOR, 2018). O arquivo identificado por “lagoas” é utilizado, que inclui também alguns espelhos artificiais. O arquivo contém 284 polígonos, com metadados associados ao nome de cada espelho, todos coletados e gerados pelo próprio IPLANFOR, no ano de 2018. Diante de muitos espelhos com área desprezível ou nomes idênticos — o que indica uma fragmentação de um espelho maior em períodos de pouca chuva — faz-se necessária uma limpeza e filtragem destes dados. Em seguida, são avaliados os dados disponibilizados em 2020 pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) mediante acesso a sua plataforma digital de dados abertos (ANA, 2020). Os arquivos apresentam massas d'água de todo o território nacional, cada um correspondente a um polígono associado a diversos metadados relevantes, facilitando a filtragem dos dados e identificação individual.

Outros arquivos em formato *shape* de Fortaleza também são fornecidos pelo Laboratório de Estudos da Habitação (LEHAB) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Estes são originários do processamento de desenhos da hidrografia de 2006, disponíveis no acervo digital da Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF, 2006). Embora sejam antigos e não possuam os metadados necessários, estes dados apresentam de forma detalhada a hidrografia da cidade, auxiliando nas avaliações e no estabelecimento de critérios para o presente estudo. As demais fontes de dados consultadas não disponibilizam dados em formato *shape* ou, se o fazem, não individualizam os corpos d'água, tornando-as incompatíveis com o estudo.

A partir de uma análise inicial, comparando os dados do

IPLANFOR, da ANA e do LEHAB, sobrepostos a uma fotografia de satélite fornecida pelo Google Earth, é possível observar que, mesmo diante da grande diferença de tempo entre as fontes, existe pouca variação na maioria dos espelhos da cidade. A exceção é a lagoa da Precabura, que apresenta uma variação considerável na sua área de polígono de 2006, explicável, provavelmente, pela baixa qualidade dos dados de satélite da época, visto que as fotografias de satélite do Google Earth daquele ano são compostas por imagens de qualidades e precisões distintas na fronteira entre Fortaleza e o município vizinho, onde se situa a lagoa mencionada. Esta análise dos dados corrobora, portanto, a hipótese de perenidade dos espelhos d'água da capital, conforme estabelecido inicialmente.

Visando filtrar os dados das diferentes fontes, o primeiro critério de seleção é a presença de metadados identificando o nome do espelho d'água e sua área. Dessa forma, enquadram-se as bases IPLANFOR e ANA. Após exclusão de espelhos sem nome e dados repetidos da base do IPLANFOR, verifica-se que, a partir dela, Fortaleza possui 38 espelhos d'água em sua extensão territorial, totalizando uma área de 6,4 km². Na Figura 4 é apresentada a classificação das superfícies de acordo com a área.

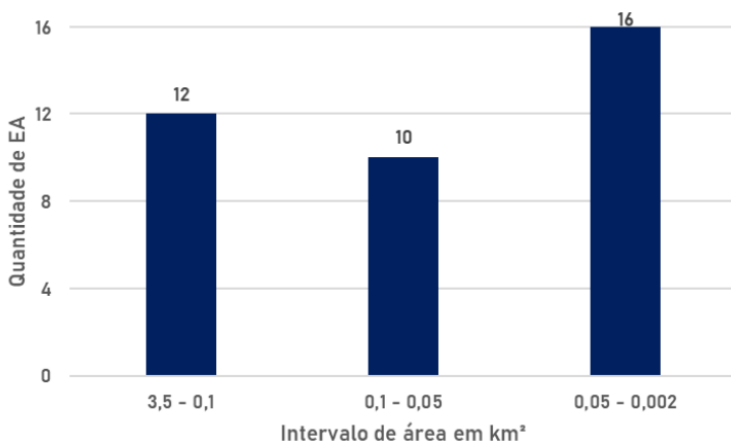


Figura 4 – Quantidade de espelhos d'água em função das áreas, adaptado de (IPLANFOR, 2018)

Considerando o volume de dados, torna-se necessário filtrá-los pela área, uma vez que significativa parcela não possui dimensões suficientes para instalação de uma usina FVF, como é o caso de 26 dos espelhos citados. Dessa forma, o critério de seleção utilizado consiste na escolha de áreas superiores a 0,1 km², resultando em 12 espelhos

d'água.

Através de uma comparação entre as poligonais das superfícies filtradas do IPLANFOR e imagens de satélite do Google Earth, verifica-se que o açude do Cocó e a lagoa do Cocó não estão presentes no referido banco de dados. Constatada a presença destes espelhos no banco de dados da ANA, é realizada a integração das poligonais no grupo filtrado do IPLANFOR; na Figura 5 é representado um mapa contendo a localização dos espelhos d'água selecionados. Na Tabela 1, esses dados são organizados em ordem decrescente de área, adicionando-se informações complementares a respeito de Zonas de Proteção Ambiental (ZPA) (IPLANFOR, 2018) e qualidade da água (SEUMA, 2022).

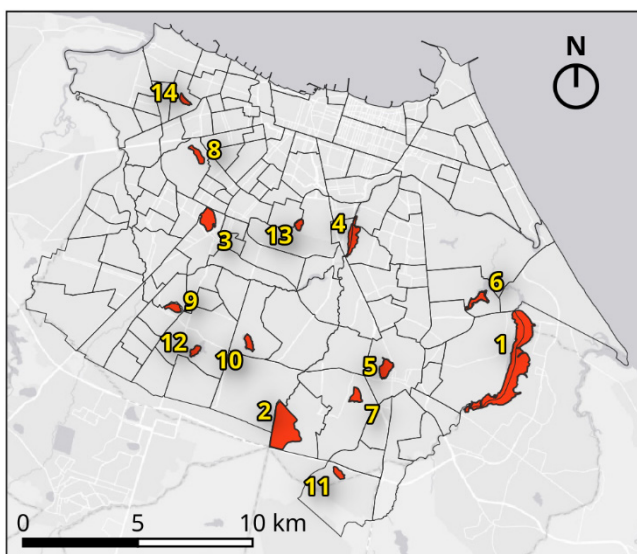


Figura 5 – Localização dos espelhos d'água selecionados a partir de dados fornecidos por (ANA, 2020), (IPLANFOR, 2018)

Tabela 1 – Caracterização dos espelhos d'água selecionados, adaptado de (ANA, 2020), (IPLANFOR, 2018), (SEUMA, 2022)

Classificação	Espelho d'água	Área (km ²)	Uso para banho/consumo
1	Lagoa da Precabura	3,044	Imprópria
2	Açude Cocó	1,698	-
3	Lagoa da Parangaba	0,475	Imprópria
4	Lagoa do Cocó	0,452	-
5	Lagoa da Messejana	0,326	Imprópria

Tabela 1 – Caracterização dos espelhos d'água selecionados, adaptado de (ANA, 2020), (IPLANFOR, 2018), (SEUMA, 2022) (cont.)

Classificação	Espelho d'água	Área (km ²)	Uso para banho/consumo
6	Lagoa Sapiranga	0,252	Imprópria
7	Lagoa do Jangurussu	0,217	Imprópria
8	Açude Santo Anastácio	0,202	Imprópria
9	Lagoa do Mondubim	0,179	Imprópria
10	Açude São Jorge	0,172	-
11	Lagoa do Ancuri	0,144	-
12	Açude Osmani Machado	0,134	-
13	Lagoa do Opaia	0,120	Imprópria
14	Lagoa do Urubu	0,113	-

Todos os 14 espelhos d'água estão em ZPA (IPLANFOR, 2018), o que inviabiliza a exploração dos mesmos e do seu entorno em atividades não sustentáveis. Desta forma, embora estudos de impacto ambiental mais aprofundados se façam necessários, uma vez inviabilizados para banho, consumo e uso não sustentáveis do ponto de vista ambiental, a utilização destes espelhos d'água para a geração FVF se mostra uma alternativa de grande valor. Vale salientar ainda que, além dos 14 espelhos d'água serem classificados como ZPA (IPLANFOR, 2018), em (COSTA, 2017) e (SILVA e BRANCO, 2018) são realizados estudos de impacto ambiental referente à utilização de FVF, nos quais são explicitados o baixo grau de impacto e as diversas vantagens do uso da tecnologia flutuante em relação à convencional sobre o solo.

Quanto à escolha dos módulos, em qualquer projeto FV os mesmos devem seguir algumas diretrizes, como a disponibilidade no mercado nacional e a autenticação dos parâmetros técnicos pelo órgão responsável (CARVALHO, 2020). Dessa forma, escolheu-se o módulo Eagle 72p, com potência de 330 Wp, eficiência de 17% e dimensões de 1956 × 992 × 40 mm. O motivo da escolha se deve ao fato deste modelo ser usado no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da UFC, em Fortaleza.

5. RESULTADOS

Para a determinação da estimativa de geração FVF em cada espelho d'água descrito na Tabela 1, simula-se a instalação física dos módulos FV em 5% da área da superfície alagada e, dentro dessa porcentagem, leva-se em consideração uma área de 34% definida para fluxo dos técnicos e eventuais manutenções (STRANGUETO, 2016). Na Tabela 2 são apresentadas a quantidade de módulos FV e a Potência Instalada (Pinst) em cada espelho d'água.

A estimativa de geração mensal em MWh pode ser descrita pela Equação 1.

$$\text{Energia} = 720 \times \text{FC} \times \text{Pinst} \tag{1}$$

Os valores mensais médios de FC para os anos de 2019 e 2022 são obtidos de plantas FV instaladas no LEA - UFC, em Fortaleza (SILVA et al., 2020). As curvas mostradas na Figura 6 representam os valores mensais do FC para estes anos e a média desses dados.

Tabela 2 – Potência instalada em cada espelho d’água selecionado

Espelho d’água	Quantidade de Módulos	Pinst (MWp)
Lagoa da Precabura	51.777	17,09
Açude Cocó	28.883	9,53
Lagoa da Parangaba	8.085	2,67
Lagoa do Cocó	7.688	2,54
Lagoa da Messejana	5.542	1,83
Lagoa Sapiranga	4.289	1,42
Lagoa do Jangurussu	3.691	1,22
Açude Santo Anastácio	3.437	1,13
Lagoa do Mondubim	3.043	1,00
Açude São Jorge	2.917	0,96
Lagoa do Ancuri	2.456	0,81
Açude Osmani Machado	2.284	0,75
Lagoa do Opaia	2.045	0,67
Lagoa do Urubu	1.924	0,63

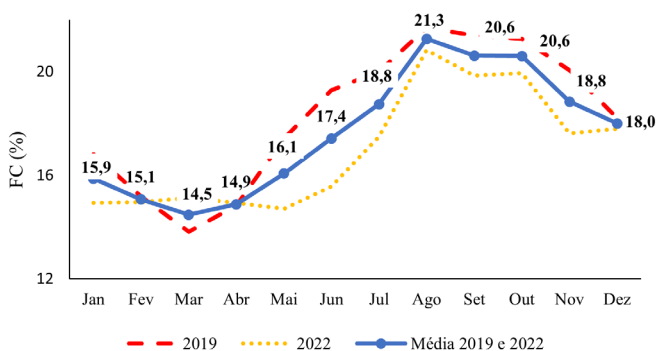


Figura 6 – Fator de capacidade em 2019, 2022 e a média, adaptado de (Silva et al, 2020).

Com base nos dados do FC, é estimada a geração de eletricidade, representada na Figura 7, considerando a instalação física em todos os espelhos d'água descritos na Tabela 1. Como esperado, os valores de geração FV no primeiro semestre são menores do que os do segundo semestre, refletindo a sazonalidade do regime de chuvas de Fortaleza. Uma geração total anual de 65,4 GWh é estimada, representando 1,4% do consumo de eletricidade anual do município em 2021.

Como exemplo de uso para atender demandas específicas, a geração FVF pode abastecer o consumo de eletricidade das escolas municipais de Fortaleza. Segundo (PMF, 2023), era necessária uma geração mínima de 13,2 GWh anuais para este fim, em 2023. Assim, a estimativa encontrada corresponde a 496,7% dessa demanda, justificando a instalação de plantas FVF no município.

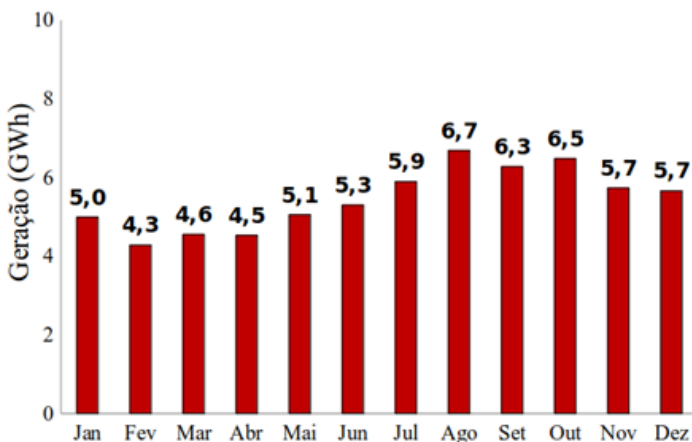


Figura 7 – Total da estimativa de geração FVF

6. CONCLUSÕES

No presente artigo é proposta uma metodologia de dimensionamento de plantas FVF urbanas, utilizando-se da cidade de Fortaleza como estudo de caso; a geração FVF anual estimada é comparada com o consumo da cidade e com a demanda de escolas municipais. Para tal, são listadas as superfícies alagadas, naturais e artificiais, sendo imprescindível a identificação do nome do espelho e sua área; metadados do IPLANFOR e da ANA são utilizados, que asseguram tais informações. Em seguida, são selecionadas apenas áreas superiores a 0,1 km², uma vez que superfícies menores dificultam a instalação de

uma planta FVF; ao final da seleção, são analisados 14 espelhos d'água.

Para a estimativa de geração é definida uma área de cobertura de 5% do espelho, sendo uma fração de 34% desta destinada ao espaçamento entre módulos; são considerados no estudo módulos de 330 Wp. Como resultado, é calculada uma geração de 65,4 GWh anuais, correspondendo a 1,4% do consumo de Fortaleza e 496,7% da demanda de escolas municipais. Tais valores podem ser otimizados com estudos aprofundados específicos sobre a área de cobertura dos módulos, para cada espelho.

Além disso, por ser uma aplicação recente, falta uma consolidação de tecnologia para sistemas de flutuação, ancoragem e conexões elétricas, etapa em que são definidos fatores como o material dos flutuadores, as conexões dos mesmos ao sistema de ancoragem, o tipo de ancoragem a ser feita e os cabos mais resistentes à umidade e à maresia. Esses aspectos dificultam estimar os custos do projeto FVF, visto que, com exceção dos custos com módulos e inversores, é difícil a mensuração dos demais componentes devido à escassez de dados de plantas FVF no Brasil e o reduzido número de empresas que fabricam flutuadores, o que representa um desafio para o avanço do setor no país. Outra questão que precisa ser aprofundada é a influência da temperatura ambiente no desempenho dos módulos FVF, pois os estudos no país sobre o tema são poucos.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Massas d'Água. 2020. Disponível em: <https://11nk.dev/ANAEspelhos>. Acesso em: 04 de jun 2023.

ARAÚJO, A. J. N.; RANK, N. I.; BUENO, T. B. A. Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba," B.S. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

ARAUJO, D. N.; BATISTA, N. E.; CARVALHO, P. C. M.; REGES, J. P.; COSTA, D.; DIAS, R.; FREITAS, D.; LIMA, S.; RAMOS, K.; RIBEIRO, S. Renewable hybrid systems: characterization and tendencies. IEEE Latin America Transactions, vol. 18, no. 01, pp. 102–112, 2020

BUSSON, B. O.; SANTOS, L. O.; CARVALHO, P. C. M.; FILHO, C. O. C. Experimental assessment and modeling of a floating photovoltaic module with heat bridges. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 12, pp. 2079–2086, 2021.

CARVALHO, T. F. Estudo sobre usinas solares flutuantes em reservatórios de água no Brasil: Estudo de caso no Rio Mossoró. Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), 2020.

COSTA, S. G. Impactes ambientais de sistemas fotovoltaicos flutuantes. PhD thesis, 2017.

CRUZ, I. S.; BATISTA, N. E.; CARVALHO, P. C. M. Renewable hybrid systems for water pumping: a review. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 10, pp. 2263–2274, 2022.

DRUZ, M.; JÚNIOR, L.; FERREIRA, A.; ELISA, M. Tendência da precipitação no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 24, 2019.

FUNCEME, “Índices de aridez do Estado do Ceará.” 2023. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=5826. Acesso em: 07 de jul 2023.

GOMES, M. C. R. Aspectos hidrogeológicos do município de Fortaleza - Ceará. Monografia de Especialização em Gestão Hídrica pelo Instituto de Geociências pela Universidade Federal do Pará, fev 2008.

HAFEEZ, H.; JANJUA, A. K.; NISAR, H.; SHAKIR, S.; SHAHZAD, N.; WAQAS, A. Techno-economic perspective of a floating solar PV deployment over urban lakes: A case study of nust lake islamabad, *Solar Energy*, vol. 231, pp. 355–364, 2022.

IBGE, CENSO Demográfico 2022: população e domicílios: primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IPLANFOR. Fortaleza em Mapas - Informações Georreferenciadas de Fortaleza. 2018. Disponível em: <https://mapas.fortaleza.ce.gov.br/>. Acesso em: 21 de jun 2023.

IPECE, “Ipecedata | sistema de informações geossocioeconômicas do Ceará.” 2021. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-dataweb/>. Acesso em: 01 de jul 2023.

LOPES, M. M.; SOUZA JUNIOR, P. A. Sistemas fotovoltaicos flutuantes: análise do tema e estudo de caso para o lago da UNIFEI. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, vol. 10, 2016.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA (PMF), “Acervo Digital de Fortaleza.” 2006. Disponível em: <https://acervo.fortaleza.ce.gov.br/>. Acesso em: 23 de jun 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA (PMF), “Comitê de Energias Renováveis analisa projeto de indicação que cria Programa Fortaleza Solar.” 2022. Disponível em: <https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/comitede-energias-renovaveis-analisa-projeto-de-indicacao-que-cria-programafortaleza-solar>. Acesso em: 29 de jun 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA (PMF), “Cpi 002/2023 – concessão administrativa, para implantação, gestão, operação e manutenção de geração de energia distribuída.” 2023. Disponível em: <https://compras.sepog.fortaleza.ce.gov.br/publico/detalhelicitacao.asp?id=1905&fonte=Novo>. Acesso em: 05 de jul 2023.

PV MAGAZINE. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2022/01/19/floating-pv-could-reach-4-8-gw-globally-by-2026/>. Acessado em 16/04/2024.

QGIS. “Welcome to the QGIS project!” 2023. Disponível em: <https://www.qgis.org/en/site/index.html>. Acessado em 17 de set de 2023.

RAVICHANDRAN, N.; FAYEK, H. H.; RUSU, E. Emerging floating photovoltaic system—case studies high dam and Aswan reservoir in Egypt. *Processes*, vol. 9, no. 6, p. 1005, 2021.

REGES, J. P.; CARVALHO, P. C. M.; ARAÚJO, J. C.; CARNEIRO, T. C. Sizing methodology of floating photovoltaic plants in dams of semi-arid areas. *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 144, no. 4, p. 041003, 2022.

RODRIGUES, P. S. F.; JATOBÁ, E. B.; NOBREGA, D. B. G.; FILHO, J. B. M. Plataforma fotovoltaica flutuante de Sobradinho (BA)-desafios e estratégias de implantação. Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, 2020.

SACRAMENTO, E. M.; CARVALHO, P. C. M.; ARAÚJO, J. C.; RIFFEL, D. B.; CORRÊA, R. M. C.; PINHEIRO NETO, J. S. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 8, pp. 1019–1024, 2015.

SEUMA. Monitoramento da qualidade da água dos recursos hídricos. 2022. Disponível em: <https://shre.ink/SEUMA-qualidade-agua>. Acesso em: 21 de jun 2023.

SIECKER, J.; KUSAKANA, K.; NUMBI, B. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 192–203, 2017.

SILVA, F.; CARNEIRO, T.; CARVALHO, P. C. M. Análise estatística da geração de eletricidade de plantas fotovoltaicas do laboratório de energias alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA-UFC). Iconnip, in Congresso Internacional Virtual de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação do Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

SILVA, G. D. P.; BRANCO, D. A. C. Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? assessing environmental impacts. *Impact Assessment and Project Appraisal*, vol. 36, no. 5, pp. 390–400, 2018.

SILVA, G.; SOUZA, M. J. R. Estimativa de geração de energia através de um sistema fotovoltaico: implicações para um sistema flutuante no lago Bolonha, Belém-Pará, *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, vol. 6, no. 2, pp. 149–164, 2017.

STRANGUETO, K. M. Estimativa do potencial brasileiro de produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de hidroelétricas. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2016.

TEMIZ, M.; JAVANI, N. Design and analysis of a combined floating photovoltaic system for electricity and hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 5, pp. 3457–3469, 2020.