

ASPECTOS TECNOLÓGICOS E SOCIOAMBIENTAIS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES

Cristiano Saboia Ruschel (EPE / UFRGS) - cristianosaboia@gmail.com

Alexandre Santucci (EPE) - alexandre-b.oliveira@epe.gov.br

Aline Couto De Amorim (Epe) - aline.amorim@epe.gov.br

Andre Viola Barreto (EPE) - andre.barreto@epe.gov.br

Gabriel Konzen (EPE) - gabriel.konzen@epe.gov.br

Gustavo Pires da Ponte (EPE) - gustavo.ponte@epe.gov.br

Leyla Adriana Ferreira da Silva (EPE) - leyla.silva@epe.gov.br

Leonardo de Sousa Lopes (EPE) - leonardo.lopes@epe.gov.br

Michele Almeida de Souza (EPE) - michele.souza@epe.gov.br

Thiago Ivanoski Teixeira (EPE) - thiago.teixeira@epe.gov.br

GLAUCE MARIA Lieggio BOTELHO (EPE) - glauce.botelho@epe.gov.br

Resumo:

A instalação de sistemas fotovoltaicos em espelhos d'água vem sendo apresentada como mais uma alternativa tecnológica para utilização da fonte solar fotovoltaica. Estes têm ganhado espaço em alguns países, especialmente aqueles que possuem restrição de terras para instalação de sistemas convencionais. Existem algumas variações tecnológicas dessa solução, principalmente com relação aos flutuadores, com diferentes tipos de estruturas sendo propostas. Ainda assim, a ideia básica é semelhante, utilizar uma plataforma flutuante fixada nas margens ou no fundo da água, sobre a qual são instalados os módulos fotovoltaicos. Este trabalho discute as potenciais vantagens e desafios de instalação desse tipo de sistema. Avalia-se que algumas das principais vantagens, como os ganhos de eficiência, necessitam de mais estudo, a fim de determinar se estas são suficientes para compensar algumas dificuldades, como por exemplo a não utilização (na maioria dos flutuadores) de rastreamento e o incremento de custos em relação aos projetos em terra. Os impactos ambientais também devem ser avaliados, principalmente com relação às alterações na vida marinha. Os projetos piloto em operação no país e no mundo podem auxiliar a responder muitas dessas questões. Considerando o maior custo de instalação, o custo da geração das fotovoltaicas flutuantes não parece competitivo neste momento. É necessário monitorar se, com o crescimento do número de instalações no mundo, os custos de estrutura serão reduzidos até um nível em que haja competitividade. Assim, deve-se acompanhar a evolução da tecnologia, permitindo sua competição com as demais, sem a necessidade de introdução de subsídios ou contratações dedicadas.

Palavras-chave: *Energia Solar, Fotovoltaica, Sistemas Flutuantes*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

ASPECTOS TECNOLÓGICOS E SOCIOAMBIENTAIS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES

Cristiano Saboia Ruschel – cristiano.ruschel@epe.gov.br
Alexandre Santucci Breves Oliveira – alexandre-b.oliveira@epe.gov.br
Aline Couto do Amorim – aline.amorim@epe.gov.br
André Viola Barreto – andre.barreto@epe.gov.br
Daniel Dias Loureiro – daniel.loureiro@epe.gov.br
Gabriel Konzen – gabriel.konzen@epe.gov.br
Glauce Maria Lieggio Botelho – glauce.botelho@epe.gov.br
Gustavo Pires da Ponte – gustavo.ponte@epe.gov.br
Leyla Adriana Ferreira da Silva – leyla.silva@epe.gov.br
Leonardo de Sousa Lopes – leonardo.lopes@epe.gov.br
Michele Almeida de Souza – michele.souza@epe.gov.br
Thiago Ivanoski Teixeira – thiago.teixeira@epe.gov.br
Empresa de Pesquisa Energética - EPE

Resumo. A instalação de sistemas fotovoltaicos em espelhos d'água vem sendo apresentada como mais uma alternativa tecnológica para utilização da fonte solar fotovoltaica. Estes têm ganhado espaço em alguns países, especialmente aqueles que possuem restrição de terras para instalação de sistemas convencionais. Existem algumas variações tecnológicas dessa solução, principalmente com relação aos flutuadores, com diferentes tipos de estruturas sendo propostas. Ainda assim, a ideia básica é semelhante, utilizar uma plataforma flutuante fixada nas margens ou no fundo da água, sobre a qual são instalados os módulos fotovoltaicos. Este trabalho discute as potenciais vantagens e desafios de instalação desse tipo de sistema. Avalia-se que algumas das principais vantagens, como os ganhos de eficiência, necessitam de mais estudo, a fim de determinar se estas são suficientes para compensar algumas dificuldades, como por exemplo a não utilização (na maioria dos flutuadores) de rastreamento e o incremento de custos em relação aos projetos em terra. Os impactos ambientais também devem ser avaliados, principalmente com relação às alterações na vida marinha. Os projetos piloto em operação no país e no mundo podem auxiliar a responder muitas dessas questões. Considerando o maior custo de instalação, o custo da geração das fotovoltaicas flutuantes não parece competitivo neste momento. É necessário monitorar se, com o crescimento do número de instalações no mundo, os custos de estrutura serão reduzidos até um nível em que haja competitividade. Ainda, não foram identificadas externalidades positivas ou benefícios em relação aos sistemas fotovoltaicos convencionais que não possam ser capturados com a regulação vigente. Assim, deve-se acompanhar a evolução da tecnologia, permitindo sua competição com as demais, sem a necessidade de introdução de subsídios ou contratações dedicadas.

Palavras-chave: Energia Solar, Fotovoltaica, Sistemas Flutuantes.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A evolução tecnológica e a redução e custos dos módulos fotovoltaicos ao longo dos últimos anos permitiram um crescimento exponencial da fonte solar fotovoltaica no mundo. O Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2029 (MME e EPE, 2019) indica que a expansão prevista da fonte solar fotovoltaica (FV) centralizada no horizonte é de 7 GW, superando 10 GW de capacidade instalada ao final do período. Em relação às tecnologias de micro e minigeração distribuídas, o supracitado documento indica que a fotovoltaica apresenta maior potencial de penetração, com capacidade instalada estimada de cerca de 10 GW em 2029.

Nesse cenário, a instalação de sistemas fotovoltaicos em espelhos d'água aparece como mais uma alternativa de aplicação, com potenciais ganhos de eficiência. Os recentes projetos-pilotos nacionais com uso de tecnologia solar fotovoltaica flutuante (FVF) associados a usinas hidrelétricas vêm ganhando visibilidade e seus resultados serão importantes para acurar os benefícios desta tecnologia, ainda pouco estudados.

Assim, o presente artigo visa trazer outras questões pertinentes à tecnologia de usinas fotovoltaicas flutuantes, apontando seus possíveis benefícios, limitações e desafios, além de abordar aspectos socioambientais no uso dos espelhos d'água.

2. DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA

A principal diferença entre um sistema solar fotovoltaico convencional (em terra) e uma usina fotovoltaica flutuante (FVF) é a plataforma flutuante (estruturas de suporte para fixação dos módulos fotovoltaicos, cabos e em alguns casos também inversores), juntamente com ancoragem e ancoradouro.

Um sistema fotovoltaico convencional em solo é composto principalmente por módulos fotovoltaicos, inversores e estruturas de suporte dos módulos, que podem ser fixas ou com rastreamento de 1 ou 2 eixos.

Basicamente, uma usina fotovoltaica flutuante é constituída de (Figura 1):

- (i) Módulos fotovoltaicos: captam a irradiação solar e convertem em energia elétrica;
- (ii) Plataformas flutuantes: estrutura de suporte para instalação dos módulos fotovoltaicos além de proporcionar estabilidade e fluabilidade a estes, contendo passarela para manutenção, suporte para os cabos elétricos e inversores, em alguns casos;
- (iii) Ancoragem e amarração: para fixação da plataforma flutuante nas margens e/ou no fundo do corpo d'água, e que deve ser capaz de resistir aos esforços causados pela variação do nível d'água e pelo vento; e
- (iv) Cabos elétricos: podendo ser inclusive cabos subaquáticos.

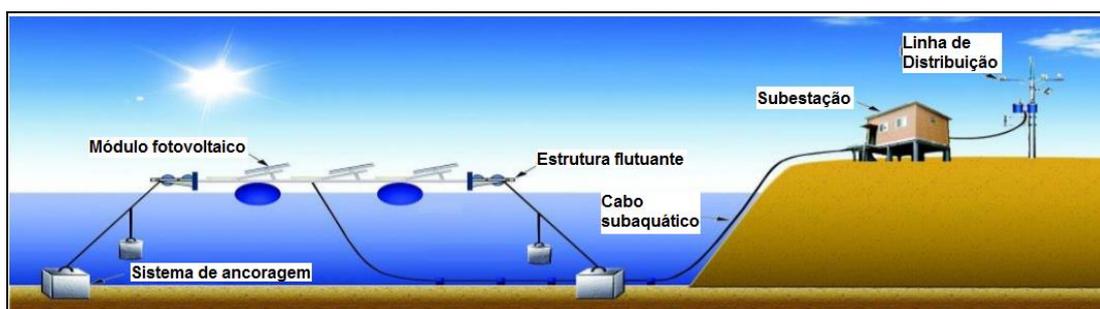


Figura 1 - Esquema geral solar fotovoltaico flutuante. Fonte: Adaptado de Choi (2014)

Dentre as plataformas flutuantes em desenvolvimento pela indústria, é possível observar diferentes tipos:

- (i) Flutuadores para suporte e fixação direta dos módulos fotovoltaicos, como por exemplo o da Figura 2.

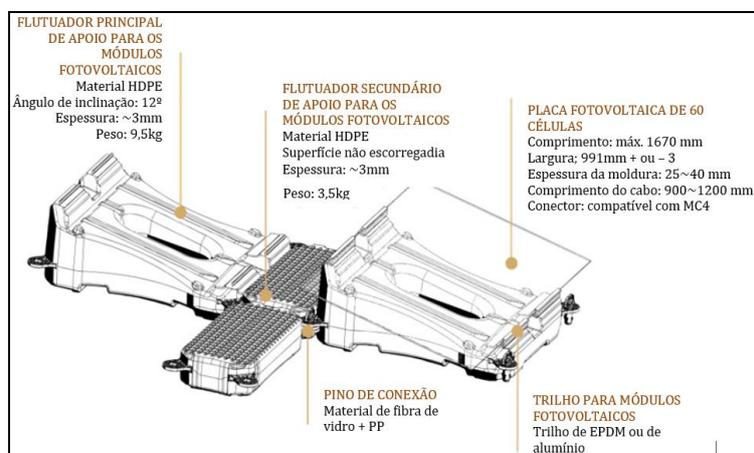


Figura 2 - Suporte para FVF da Hydrelio©. Fonte: Adaptado de Alternative Energy (2019)

- (ii) Flutuadores + Estruturas metálicas (para apoiar os módulos fotovoltaicos) - são mais simples que o anterior, sendo similares aos sistemas em terra, como mostrado na Figura 3;

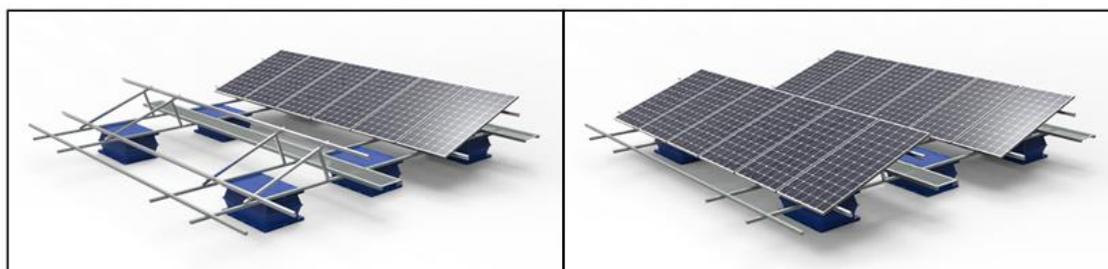


Figura 3 - Plataforma de estrutura de metal com flutuadores e módulos fotovoltaicos. Fonte: Scotra (2019)

(iii) Membranas e tapetes - projetadas para suportar o estresse mecânico e a exposição ao sol, cobrem a superfície da água e criam uma base para instalação dos módulos (Figura 4).



Figura 4 – Plataforma FVF - Membrana. Fonte: Ocean Sun (2019)

(iv) Estrutura tubular - módulos com suportes fixos, para maximizar a cobertura da área disponível, ou com rastreamento, para otimizar a geração de energia (Figura 5).

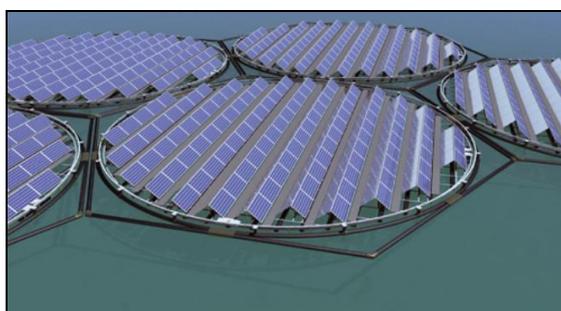


Figura 5 - Estrutura modular de uma FVF. Fonte: Koine Multimedia (2019)

O sistema de ancoragem e amarração é uma parte crítica de uma FVF. Existem três formas de ancoragem: banco de ancoragem ou ancoragem em bloco, ancoragem inferior ou de fundo, e pilar ou estaca. Para definir o sistema de ancoragem do projeto é necessário obter dados do local como topografia, batimetria, composição do solo, variação do nível d'água, velocidade e direção do vento. A ancoragem dos blocos é mais adequada a lagoas pequenas e com pouca profundidade, porém, a maioria das instalações flutuantes é ancorada no fundo. Independentemente do método, esta precisa ser projetada de forma a garantir estabilidade e fluviabilidade das instalações pelo tempo em que deverá operar (cerca de 25 anos ou mais).

Do mesmo modo que no sistema fotovoltaico convencional, é possível utilizar rastreador de 1 eixo (vertical) também no caso de fotovoltaico flutuante, vide Figura 6. O mecanismo de rastreamento de uma FVF pode ser através de uma grande plataforma flutuante que pode girar em torno de um eixo vertical, de propulsores que quando acionados fazem a plataforma girar, ou ainda por meio de um sistema rolante que faz girar a plataforma flutuante. Há também inovação nesta área de FVF com estrutura da plataforma flutuante com rastreamento em 2 eixos (SolarisFloat, 2019).

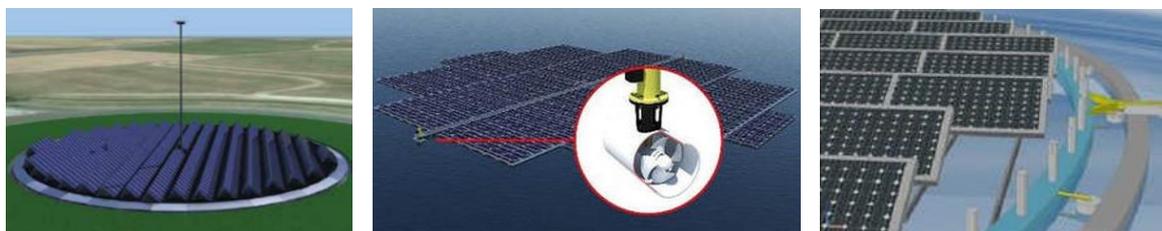


Figura 6 - Tipos de rastreamento de 1 eixo de FVF: (a) eixo vertical; (b) com propulsores; (c) com roda rolante para girar a plataforma principal. Fonte: Koine Multimedia (2019)

3. POTENCIAIS BENEFÍCIOS E DESAFIOS DE USO

Diversos estudos sobre usinas fotovoltaicas flutuantes indicam possíveis vantagens com a implantação de FVF, tais como ganhos de eficiência; redução de perda por sombreamento e sujeira; e redução da evaporação dos reservatórios. Por outro lado, algumas desvantagens também são observadas, como o acúmulo de dejetos de pássaros e impacto na vida aquática local. Esses e outros itens são ilustrados na Figura 7 e serão discutidos em detalhes a seguir.

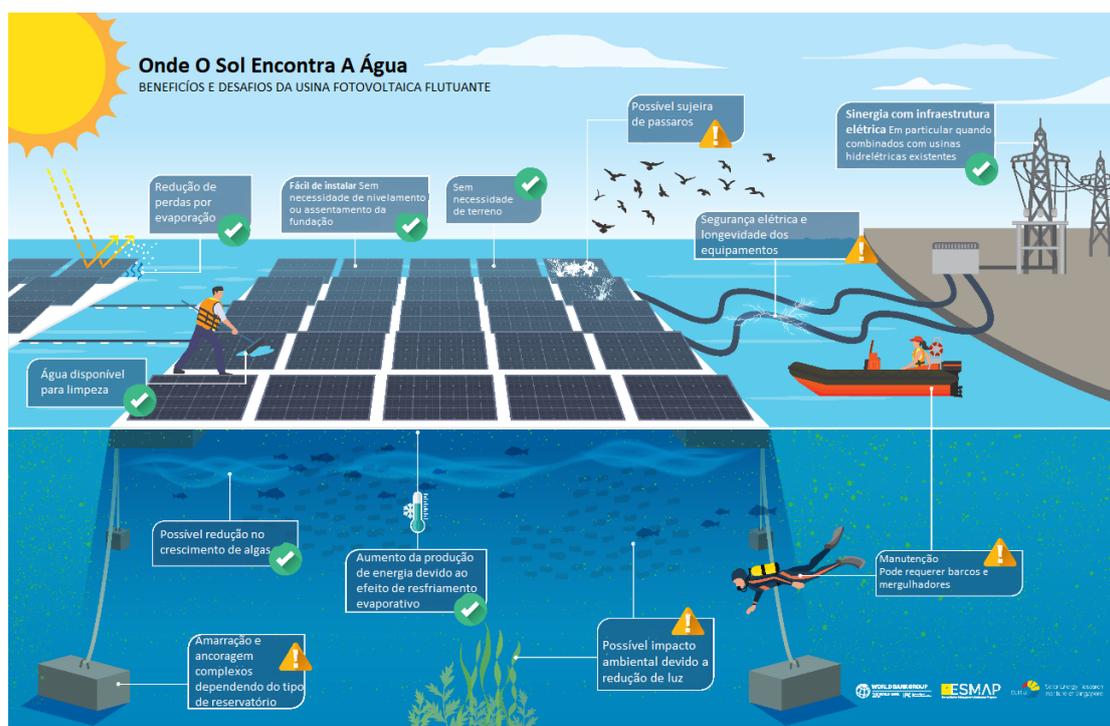


Figura 7 - Benefícios e desafios da solar flutuante. Fonte: adaptado de ESMAP (2019)

3.1 Ganhos de eficiência

A perda de eficiência nos módulos fotovoltaicos está diretamente relacionada ao aumento da temperatura das células, sendo um possível aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos de uma FVF uma das vantagens mais citadas em diversos estudos, dado que a temperatura de operação dos módulos instalados sobre a água tende a ser mais baixa do que a de um sistema fotovoltaico em solo. Registram-se temperaturas entre 5 e 20% inferiores nestas instalações, o que depende muito da localização, do clima da região e da estrutura de flutuação utilizada (REC, 2018).

Esse benefício, porém, ainda não está claro. Enquanto os fornecedores de estruturas flutuantes indicam ganhos de até 25% na produção de energia, estudos experimentais apontam resultados distintos. Um estudo na Coreia do Sul (Choi, 2014) encontrou ganhos de 11% da produção FVF em relação a uma usina convencional com estruturas fixas. Sacramento, *et al.* (2015) encontraram ganhos de eficiência entre 9,5% e 14,5%. Por sua vez, um estudo experimental com usinas flutuantes na Itália (Cazzaniga *et al.*, 2018) aponta que a produção com FVF é 4% maior do que em solo com estruturas fixas, porém, quando comparada com FV com rastreamento, a produção da FVF é bastante inferior.

Tendo em vista que o resfriamento evaporativo depende da temperatura de bulbo úmido local, que por sua vez depende da temperatura ambiente e temperatura de bulbo seco, além da velocidade do vento, tais ganhos dependem do local considerado. Regiões do semi-árido com alta velocidade de vento tendem a ter um ganho superior a localidades com alta umidade e baixo vento (Galdino e Olivieri, 2016).

Importante destacar que os ganhos estimados na maioria dos estudos consideram instalações fixas, enquanto 96% dos atuais projetos fotovoltaicos no Brasil (nos leilões do mercado regulado) consideram estruturas de rastreamento em um eixo (EPE, 2018a), que proporcionam ganhos da ordem da ordem de 13% a 22%, com vantagens maiores em menores latitudes (Guarnieri, 2017). Embora também seja possível o rastreamento em estruturas flutuantes, essa não é a tendência observada nas recentes instalações. Assim, é importante atentar sempre para a base de comparação, a fim de certificar-se que esta considera as práticas de dimensionamento utilizadas para o local de estudo.

Ainda, o crescimento na utilização de módulos bifaciais pode representar uma vantagem para a utilização de módulos em solo, mas nem tanto para os sistemas flutuantes, uma vez que a maior parte da reflexão da água ocorre de maneira especular, e não pode ser aproveitada pela face posterior dos módulos (a menos de momentos no qual a reflexão ocorra exatamente nesse ponto). De fato, Galdino e Olivieri (2016) mostram que, em geral, a refletividade da água sem ondas supera o albedo do solo somente para ângulos de incidência solar acima de 70%, o que acontece em locais de elevada latitude, que não é o caso do Brasil, ou em horários de baixa irradiância. Adicionalmente, em alguns tipos de flutuadores, como os da Figura 2, as costas dos módulos ficam bloqueadas (como em um telhado), praticamente anulando o aproveitamento do albedo. Para os módulos instalados no solo, embora os ganhos com essa tecnologia ainda sejam incertos, estima-se que sejam da ordem de 4 a 15% a depender do local, tipo de módulo, e albedo, em adição aos ganhos com rastreamento (Ayala Pelaez *et al.*, 2019).

3.2 Sujeira

As usinas flutuantes possuem a tendência de acumular menor quantidade da poeira transportada pelo vento em seus painéis, pois são instaladas longe do solo e sobre o espelho d'água (Da Silva, 2019). Dessa forma, requerem menores quantidades de água para limpeza do que usinas fotovoltaicas localizadas em terra (Cazzaniga et al., 2019). O uso de água pode ser um fator de complexidade socioambiental para usinas em terra, uma vez que, no Brasil, as áreas de maior potencial de geração situam-se em regiões de pouca disponibilidade hídrica. Nas flutuantes, a água está disponível in loco, podendo ser utilizada para a limpeza dos painéis, a depender de suas características (Sahu, Yadav e Sudhakar, 2016), mas tal uso deve ser discutido com os órgãos ambientais.

Por outro lado, as usinas flutuantes podem se transformar em áreas de pouso para a avifauna (Costa, 2017) e de acúmulo de dejetos de pássaros nos módulos flutuantes, com maior frequência do que nos módulos em terra, o que poderia causar um incremento nos custos de limpeza ou nas perdas por sujidade.

Os dejetos da avifauna nos painéis, em última instância, contribuem para o aumento da disponibilidade de nutrientes na água, principalmente nitrogênio e fósforo (Dessborn, Hessel e Elmberg, 2016). Em função da quantidade de painéis a serem instalados e também das condições locais, como a densidade de aves no local, a concentração de nutrientes naturais e o tempo de residência da água, estes efeitos podem ser significativos e acarretar alterações na qualidade ambiental. Eventuais aplicações de produtos químicos para limpeza dos painéis, ou mesmo para minimizar o acúmulo de sujeira em sua superfície, poderá trazer ainda mais efeitos negativos para a qualidade da água (Costa 2017).

3.3 Sombreamento

Além do possível menor acúmulo de poeira, outro benefício esperado é a redução do sombreamento nos módulos fotovoltaicos, que associada à redução da temperatura de operação tendem a aumentar a geração de energia em comparação com uma instalação FV em terra com inclinação similar. Contudo, destaca-se que tal redução é devido à inclinação utilizada nas usinas flutuantes, que tende a ser inferior à ótima, especialmente em latitudes mais altas, para redução dos esforços de ventos. Assim, novamente deve-se atentar se a comparação entre a usina flutuante e a em terra está considerando um projeto típico para a localidade em questão.

Outro ponto relevante diz respeito à variação do nível d'água do reservatório, que pode afetar a inclinação dos módulos caso os flutuadores sejam instalados próximo à margem, podendo causar maior sombreamento ou levar à operação em ângulo desfavorável.

3.4 Evaporação dos Reservatórios

Segundo Farfan e Breyer (2018), a cobertura de 25% da superfície de reservatórios de hidrelétricas com FVF poderia aumentar em 6,3% a disponibilidade de água, por redução da evaporação. Rosa-Clot, Tina e Nizetic (2017) estimaram por meio de modelos matemáticos o efeito da cobertura FVF em reservatórios na Austrália, concluindo pela redução da taxa de evaporação em mais de 90%. Resultado equivalente foi estimado por Taboada *et al.* (2017) ao avaliar o efeito da cobertura FVF em lagoas no Chile. Destaca-se que as regiões estudadas apresentam naturalmente elevadas taxas de evaporação, em função do clima local, logo, a cobertura desses corpos d'água tem efeito significativo.

Os impactos na redução de evaporação podem ser interessantes em locais com baixa disponibilidade hídrica. Ressalta-se, contudo, que há outras soluções para redução de evaporação em reservatórios que podem ser mais interessantes em termos de viabilidade econômica. Gugliotti (2015), descreve alternativas para redução de evaporação utilizando filmes superficiais, que permitiria inclusive outros usos da água (embora com perda de eficiência do filme) de maneira concomitante à aplicação. Malandrino *et al.* (2015) discutem o uso de bolas de sombra para redução de evaporação, com estudo de dois casos, em Israel e em Los Angeles (EUA).

De toda forma, cabe lembrar que, em grandes corpos de água, não é esperado que a cobertura de módulos seja relevante em termos de fração da área total. Assim, a redução da evaporação, embora seja um ganho acessório das usinas flutuantes, não deve ser a solução para esta questão. No entanto, para os casos nos quais sejam adotadas soluções que recubram grande parte do reservatório, acarretando significativa redução da evaporação, deverão ser estudadas também as alterações no microclima local (Galdino e Olivieri, 2016; Ferrer-Gisbert *et al.*, 2013; Santafé *et al.*, 2014; Gaikwad e Deshpande, 2017; Wästhage, 2017; Dinesh e Pearce, 2016; Cazzaniga, 2019).

3.5 Impactos na vida aquática

Diversos aspectos devem ser considerados para avaliação das alterações na biota aquática oriundas da implantação das FVFs, sendo o mais relevante o porte do empreendimento. A implantação em pequena escala das FVFs tende a apresentar impactos na vida aquática irrelevantes, podendo, em alguns casos, resultar em alterações positivas para os organismos aquáticos (Costa, 2017). Estas alterações positivas no ambiente são ocasionadas em função da ocorrência de níveis intermediários de distúrbios, que tendem a aumentar a biodiversidade local (Vera Y Conde e Rocha, 2006), possivelmente associados à criação de nichos ecológicos específicos.

O sombreamento de áreas do reservatório é um bom exemplo de efeito que possui uma certa dubiedade em relação às interferências na vida aquática. Em pequena escala, o sombreamento pode apresentar aspectos positivos relacionados à criação de áreas de abrigo e forrageamento da ictiofauna. Ao passo que, caso sejam implantadas em um grande

percentual da superfície do reservatório, o sombreamento pode causar a redução da atividade fotossintética local, acarretando desequilíbrios na cadeia trófica com eventuais favorecimentos de espécies e/ou redução de determinadas populações (Costa, 2017; Dempster e Taquet, 2004; Sahu, Yadav e Sudhakar, 2016; Galdino e Olivieri, 2016).

Outro efeito importante é o aumento de incrustação nas instalações associadas às usinas FVFs, tais como sistemas de ancoragem e flutuadores. A depender do local da instalação, poderá haver interferências sobre a fauna bentônica, devido às instalações dos sistemas de ancoragem, podendo interferir também sobre a dinâmica de movimentação de sedimentos (Costa, 2017). Este aumento da fauna bentônica associado à incrustação nas estruturas pode acarretar num aumento dos fluxos de matéria orgânica da coluna d'água para o sedimento, podendo ocasionar a diminuição dos níveis de oxigênio nas camadas de fundo.

Neste sentido, a escolha do local de instalação das usinas possui especial relevância em relação às alterações no meio ambiente, sendo interessante privilegiar as regiões com maior fluxo de água e consequentemente menor tempo de residência, obviamente sem que haja comprometimento às estruturas.

3.6 Geração Híbrida com Hidrelétricas

A instalação fotovoltaica flutuante no reservatório de uma hidrelétrica pode resultar na otimização do uso da rede de transmissão/distribuição. Outra vantagem seria a possibilidade de armazenar mais água caso a geração fotovoltaica desloque a hidrelétrica, atuando como uma “bateria virtual”. Porém, tal esquema de operação só seria possível em usinas com reservatório. Em usinas a fio d'água, com a capacidade de regularização mais limitada, não haveria essa versatilidade na operação, comportando-se ambas de maneira mais próxima a um conjunto não despachável. No caso de usinas hidrelétricas reversíveis, a FVF poderia ainda gerar energia para o bombeamento de água ou para aumentar a sua energia injetada na rede.

De fato, os estudos sobre usinas híbridas (EPE, 2018b) tratam dos benefícios de usinas associadas, especialmente se fosse possível a contratação de um Montante de Uso do Sistema de Transmissão/Distribuição (MUST/MUSD) inferior à soma das potências das duas fontes, o que depende de mudanças regulatórias. O estudo destaca ainda que, no caso de associação de usinas solares com hidrelétricas, é necessária a discussão sobre possíveis dificuldades operativas, já que a fonte hídrica pode ser despachada centralizadamente, ao contrário da fotovoltaica.

Na questão do hibridismo, a princípio é indiferente a fotovoltaica ser flutuante ou instalada em terra, ao lado do reservatório. Inclusive, a maior planta híbrida solar-hidrelétrica em operação, em Qinghai, China, não utiliza FVF, e sim um sistema montado em terra, a 30 km do reservatório (Cazzaniga *et al.*, 2019).

Discussões mais detalhadas a respeito de usinas híbridas não serão escopo deste estudo, pois estas já foram realizadas no estudo citado da EPE, bem como em Nota Técnica mais recente (EPE, 2019), que apresentou experiências internacionais e aspectos relevantes ao planejamento com hibridismo. Adicionalmente, a ANEEL lançou Consulta Pública n. 014/2019 sobre o tema “Usinas híbridas”, na qual são tratadas questões regulatórias.

3.7 Uso da terra

Uma das vantagens da usina solar flutuante está no fato de, ao contrário das usinas fotovoltaicas convencionais, praticamente não ocupar espaço em terra, apenas a área necessária para o eletrocentro e a conexão. Essa característica pode ser útil principalmente em países com alta densidade populacional e/ou com restrição de terra firme. No Brasil, a escassez de áreas para a implantação desses projetos não é considerada uma questão particularmente relevante. Em estudo, excluindo-se unidades de conservação, terras indígenas, comunidades quilombolas, áreas de Mata Atlântica com vegetação nativa, áreas urbanas, reserva legal e área de preservação permanente, o potencial técnico para instalação de usinas fotovoltaicas foi superior a 28.500 GW. Foram consideradas apenas áreas com declividade inferior a 3%, e área superior a 0,5 km² (EPE, 2016).

Ainda que não haja escassez de áreas, a economia com a não necessidade de compra ou arrendamento de terra, e com a preparação do solo pode ser citada como uma vantagem, evitando-se ainda impactos socioambientais associados à alteração de uso do solo, movimentação de terra, eventual supressão vegetal, perturbação da fauna, dentre outros. Muito embora o gasto com terreno seja em geral baixo nos projetos no Brasil, em determinadas regiões tal vantagem pode ser considerada. De maneira semelhante, restrições de locais de implantação podem levar essa solução a ser interessante, como por exemplo o uso de açudes em propriedades rurais, mantendo a terra livre para a produção agropecuária e produzindo energia na modalidade micro/mini geração distribuída (*net metering*) ou autoprodução.

Em contrapartida, deve-se considerar que as instalações fotovoltaicas flutuantes de grande porte poderão implicar em restrições à navegação, eventualmente causando interferências em atividades recreativas, de pesca e de turismo. A alteração na paisagem também poderá impactar as atividades de lazer e turismo (Costa, 2017; Da Silva, 2019).

3.8 Custos de investimento

As possíveis desvantagens da FVF estão principalmente relacionadas à viabilidade econômica, sobretudo em função dos custos adicionais com instalação de plataformas flutuantes. Por se tratar de uma nova tecnologia, requer equipamentos e conhecimentos especializados, alguns dos quais ainda estão sendo desenvolvidos ou aprimorados. Assim, dadas as possíveis dificuldades adicionais de O&M, é possível que haja um incremento do custo de operação.

Por ser uma tecnologia nova, ainda não há dados ou estudos suficientes que permitam avaliar se tal sobrecurso existe e qual sua magnitude.

Depreende-se que uma FVF tem um custo maior devido à estrutura flutuante (incluindo também sistema de fixação e ancoragem). Segundo o estudo do Banco Mundial (World Bank Group, SERIS e ESMAP, 2019) o CAPEX de uma FVF chega a ser quase 18% maior. Um estudo da consultoria Bridge to India (2018) indica que os custos de investimento para uma fotovoltaica flutuante, naquele país, são entre 20 e 25% superiores aos de uma usina em terra, principalmente devido ao maior custo dos flutuadores. É destacado que atualmente estes são importados, e sugerido que, se fabricados localmente, a desvantagem de custos poderia cair para cerca de 10-15%. A comparação apresentada no documento demonstra que a ordem de grandeza da economia com transmissão e uso da terra é significativamente inferior ao incremento do custo das estruturas.

Para as usinas fotovoltaicas em solo, cadastradas nos leilões de energia, os custos totais de investimento têm apresentado queda, reduzindo as margens para acréscimos de custos nos projetos. Os custos de estruturas têm crescido nos últimos leilões em termos relativos, tendo passado de 13% em 2016 para 15% do total do CAPEX em 2019, considerando a média dos projetos. Dado que o custo da estrutura não é desprezível, e que em usinas flutuantes este tende a ser mais elevado, esse tipo de sistema tende a não ser competitivo com os sistemas em terra, especialmente considerando os pontos levantados na seção 3.1.

3.9 Instalação e Manutenção

Nas referências consultadas depreendem-se algumas dificuldades para a instalação deste tipo de tecnologia, se comparada à fotovoltaica convencional em solo. Fatores como rajadas de vento e outras condições meteorológicas podem ser complicadores na montagem e na ancoragem dos módulos fotovoltaicos, e também na fase de operação da usina. A variação do nível d'água em reservatórios também pode ser um complicador, especialmente em reservatórios de hidrelétricas a fio d'água. Por outro lado, em locais com ancoragem e fixação menos complexas, como em lagos artificiais ou açudes, a rapidez e facilidade de instalação são destacados como vantagens.

Os corpos d'água onde serão instaladas as FVF podem abrigar patrimônio arqueológico subaquático, de forma que deverão ser realizados estudos prévios para sua identificação e, se necessário, seu resgate ou a indicação de alteração locacional do projeto (Costa 2017).

Na questão da operação, pode haver dificuldades adicionais em relação aos projetos em terra. A manutenção da ancoragem ao longo da vida útil do projeto, por exemplo, pode requerer mão de obra especializada, com o uso de mergulhadores. A utilização de cabos subaquáticos também merece atenção especial, por questões relacionadas à segurança e à fauna aquática.

3.10 Vida Útil dos Equipamentos

No longo prazo, o impacto da umidade nos módulos fotovoltaicos e a possibilidade de corrosão de fixadores são pontos que devem ser avaliados. Fato é que o problema de corrosão é limitado quando o FVF está instalado em corpos de água doce, enquanto que em água salgada devem ser adotadas soluções para amenizar tal condição (Group, SERIS e ESMAP 2019). A maior umidade a que os módulos são expostos quando próximos da água pode ainda acelerar sua degradação, sobretudo pelo efeito PID (*Potential Induced Degradation*) (Borba e Novak, 2018), o que reforça a importância da escolha de equipamentos adequados à aplicação flutuante. Módulos com filme posterior de maior resistência à umidade ou de duplo vidro são considerados mais adequados para essas aplicações, podendo haver algum sobrecurso em relação aos módulos convencionais (Bridge to India, 2018). A vida útil dos flutuadores também pode ser um limitante, e essa questão, assim como eventuais necessidades de troca dos mesmos durante a operação devem ser avaliadas na fase de projeto.

Assim como nas usinas solares fotovoltaicas instaladas em terra, o descarte dos painéis e demais componentes das plantas representa um desafio para a gestão socioambiental. O Brasil, por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), instituiu a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, mas ainda não existe infraestrutura nacional de reciclagem especializada em painéis fotovoltaicos.

4. CONTEXTO INTERNACIONAL E PROJETOS NO BRASIL

O estudo do Grupo Banco Mundial (World Bank Group, SERIS e ESMAP, 2019) demonstra que a capacidade instalada de FVF no mundo saltou de apenas 11 MWp em 2014 para 528 MWp em 2017 e 1.314 MWp em 2018. A maioria das grandes instalações recentes foi feita na China, especialmente em lagos de mineração. Há estimativas de crescimento acelerado nos próximos anos, bastante influenciadas pela China e pela Coreia do Sul, e com crescimento importante de outros mercados, com destaque para a Índia. Este país tem metas agressivas de inserção de renováveis no setor elétrico, e, dada a restrição de áreas aptas com infraestrutura adequada de conexão, a Solar Energy Corporation of India (SECI), instituição governamental, indicou no final de 2017 intenção de construção de até 10 GW de FVF nos três anos seguintes (SECI, 2017). Em outubro de 2018, reportava-se haver cerca de 1,5 GW em projeto e menos de 3 MW instalados (Bridge to India, 2018).

4.1. Aproveitamento no Brasil

Com relação à possibilidade de maior inserção dessa tecnologia no Brasil, a princípio, não há impedimentos regulatórios, ao menos no que diz respeito ao setor elétrico. Entende-se como possível inclusive a participação nos leilões de energia do Ambiente de Contratação Regulada (ACR), ainda que nenhum projeto desse tipo tenha sido cadastrado na EPE até então.

Há que se observar, porém, questões relativas ao licenciamento ambiental do empreendimento, bem como comprovação do direito de usar e dispor do local destinado ao empreendimento. Para o caso de uma usina flutuante, tal comprovação pode envolver questões ligadas à navegação e aos usos múltiplos do reservatório. A depender do tipo de reservatório, podem ser necessárias autorizações da Agência Nacional de Águas (ANA), Marinha do Brasil, Capitania dos Portos, dentre outros órgãos. As legislações que disciplinam o gerenciamento de recursos hídricos, no âmbito federal, são a Lei n. 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e a Lei n. 9.984/2000, que dispõe sobre a criação da ANA. Adicionalmente, existem normativas específicas publicadas tanto pela ANA quanto pelos Estados e Distrito Federal, bem como deliberações do Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Dado o ineditismo da tecnologia, ainda não há clareza quanto a necessidade de autorizações em cada caso.

No Brasil, a maior usina fotovoltaica flutuante em operação encontra-se no reservatório da UHE Sobradinho, na Bahia (Figura 8). A primeira etapa do projeto conta com 1 MW_p, inaugurada em julho de 2019, e terá capacidade de 2,5 MW_p até 2020. Em fase de projeto encontra-se a FVF que será instalada no reservatório da UHE Balbina, também com capacidade prevista de 2,5 MW_p.



Figura 8 - Usina FVF no reservatório da UHE Sobradinho. Fonte: visita técnica EPE em 10/2019

Em Goiás, o primeiro projeto FVF conectado à rede foi instalado em uma propriedade rural, em 2017, com 1.150 módulos fotovoltaicos e uma potência de 304 kW_p (Sunlution, 2019). A FVF instalada no reservatório da UHE Porto Primavera, em Rosana – SP, tem potência instalada de 50 kW, além de 250 kW em terra. Outro projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) recente instalou 100 kW de FVF no reservatório da hidrelétrica do município de Aimorés (MG) (Alsol, 2019). Em fase de desenvolvimento, um projeto da empresa Furnas Centrais Elétricas implantará uma FVF de 200 kW_p no reservatório da hidrelétrica de Itumbiara, associado a tecnologias de armazenamento.

Destaca-se que os resultados desses projetos em andamento serão importantes para a discussão dos benefícios e limitações tratados no capítulo 3.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mercado de energia solar fotovoltaica flutuante tende a crescer com o amadurecimento das tecnologias, abrindo uma nova frente para a expansão global de energia renovável e trazendo oportunidades de crescimento para vários países e mercados, especialmente em locais com restrições de terras. De fato, regiões onde existe escassez de terra, outros usos do solo e o custo de aquisição ou arrendamento de terras são mais elevados, sob a ótica de viabilidade econômica, podem ser locais mais apropriados à fotovoltaica flutuante. Dada a elevada disponibilidade de terras no Brasil, a custos baixos nas regiões de melhor irradiação, esse tipo de vantagem fundiária não é tão relevante.

Com um número cada vez maior de parques em operação no mundo, inclusive com alguns projetos de P&D no Brasil, será possível obter dados mais robustos e precisos especialmente sobre a eficiência dos módulos, evaporação e degradação dos módulos fotovoltaicos, e minimizar incertezas relacionadas a custos, complexidades tecnológicas e impactos socioambientais.

Do ponto de vista do planejamento energético, o fato das instalações fotovoltaicas se darem em terra ou em espelhos d'água é indiferente, cabendo aos empreendedores prospectar os projetos mais competitivos, inclusive avaliar ganhos sinérgicos no caso de usinas híbridas.

Dentre os benefícios da FVF, espera-se que os ganhos de eficiência devido à redução da temperatura dos módulos levem a uma produção maior que em instalações em solo (comparando com em estruturas fixas). Porém, ainda não há

clareza sobre os ganhos de produção com a instalação de um solar flutuante no lugar de uma usina solar convencional, sendo apontados ganhos menos expressivos em experimentos recentes no Brasil, especialmente em locais mais úmidos. Além disso, a maioria dos novos projetos em terra considera rastreamento em um eixo, proporcionando ganhos equivalentes ou superiores. A utilização de módulos bifaciais favorece também as instalações em terra, dada a maior reflexão difusa do solo em relação à água.

Considerando o maior custo de instalação, o custo da geração das FVF não parece competitivo neste momento. É necessário monitorar se, com o crescimento do número de instalações no mundo, os custos de estrutura serão reduzidos até um nível em que haja competitividade. Ainda, não foram identificados externalidades positivas ou benefícios em relação aos sistemas fotovoltaicos convencionais que não possam ser capturados com a regulação vigente. Pelas razões citadas, deve-se acompanhar a evolução da tecnologia, permitindo sua competição com as demais, sem a necessidade de introdução de subsídios ou contratações dedicadas.

Com o desenvolvimento do mercado solar fotovoltaico no Brasil, ainda que já seja permitida a participação nos leilões, deve-se buscar eliminar barreiras ao desenvolvimento de usinas flutuantes, por meio de regramentos claros, em especial aqueles ligados ao licenciamento ambiental e uso da área, de forma a promover a competição com igualdade de condições entre as diferentes soluções, levando ao menor custo de geração. Mostrando-se competitiva, a tecnologia solar flutuante poderia encontrar naturalmente o seu espaço no mercado brasileiro.

REFERÊNCIAS

- Alsol, 2019. Alsol investe em usina solar flutuante com tecnologia 100% nacional. <http://alsolenergia.com.br/blog/usina-solar-flutuante/> (acesso em 29 de 11 de 2019).
- Alternative Energy, 2019. Floating solar panels: a viable solution? <http://www.alternative-energy-news.info/floating-solar-panels/> (acesso em 15/07/2019).
- Ayala Pelaez, S, Deline, C., Greenberg, P., Stein, J.S., e Kostuk, R.K., 2019. Model and Validation of Single-Axis Tracking With Bifacial PV. *IEEE Journal of Physics* 9, nº 3 pp. 715-721.
- Borba, R.A., Novak, L.H., 2018 Sistemas fotovoltaicos flutuantes: aspectos positivos e desafios. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- BRASIL. Lei n. 9.433 de 8 de janeiro de 1997. 1997. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm.
- Lei n. 9.984 de 17 de julho de 2000. 2000. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9984.htm.
- Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. 2010. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm
- Bridge to India, 2018. Floating solar. Opportunities and way ahead..
- Cazzaniga, R, Cicu M., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G.M, Ventura, C., 2018. Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1730-1741.
- Cazzaniga, R, Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina,G.M., 2019. Integration of PV floating with hydroelectric power plants. *Heliyon*. Elsevier.
- Choi, Y. K., 2014 A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. *International Journal of Software Engineering and Its Applications* 8, nº 1: pp. 75-84.
- Costa, S.G., 2017 Impactes ambientais de sistemas fotovoltaicos flutuantes. Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa.
- Da Silva, G D. P., 2019. Large-scale solar photovoltaic impact assessment in the context of the Brazilian environmental and energy planning. Dissertação de mestrado, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético.
- Dempster, T., Taquet, M., 2004. Fish aggregation device (FAD) research: gaps in current knowledge and future directions for ecological studies. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 14, nº 1: pp. 21–42.
- Dessborn, L., Hessel, R., Elmberg, J., 2016 Geese as vectors of nitrogen and phosphorus to freshwater systems. *Inland Waters* 6, nº 1: pp. 111-122.
- Dinesh, H., Pearce, J.M., 2016. The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: pp. 299-308.
- EPE, 2016 Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro, 2016.
- EPE, 2018a. Projetos Fotovoltaicos nos Leilões de Energia. Características dos empreendimentos participantes nos leilões de 2013 a 2018.
- EPE, 2018b. Usina Híbridas. Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento. (EPE-DEE-NT-011/2018-r0).
- EPE, 2019. Usinas híbridas no contexto do planejamento energético (EPE-DEE-NT-029/2019-r0).
- ESMAP, 2019. https://esmap.org/where_sun_meets_water_floating_solar_market_report (acesso em 05/09/2019).
- Farfan, J., Breyer, C., 2018. Combining floating solar photovoltaic power plants and hydropower reservoirs: a virtual battery of great global potential. *Energy Procedia*, 155ª ed.: pp. 403-411.
- Ferrer-Gisbert, C., Ferrán-Gozálvez, J.J., Redón-Santafé, M., Ferrer-Gisbert, P., Sánchez-Romero, F.J., e Torregrosa-Soler, J.B, 2013. A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs. *Renewable Energy* 60: pp. 63-70.
- Gaikwad, O.D., Deshpande, U.L., 2017. Evaporation control using floating pv system and canal roof top solar system. *International Research Journal of Engineering and Technology* 4, nº 4: pp. 214–216.

- Galdino, M.A.E., Olivieri M.M.A., 2016 Considerações sobre a implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes no Brasil. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Guarnieri, M. V., 2017 Usinas solares fotovoltaicas com seguimento em um eixo no Brasil: aspectos da construção, custos e expectativa de desempenho. Dissertação de Mestrado: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Gugliotti, M., 2015 Redução da evaporação em reservatórios por filmes superficiais. Meio filtrante. <http://meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=18208&link=noticias> (acesso em 20 de junho de 2018).
- Koine Multimedia. 2019. <http://www.koinemultimedia.eu/wp/sample-page/> (acesso em 25 de setembro de 2019).
- . 2019. <http://www.floating-solar.com/technologies.html> (acesso em 06 de setembro de 2019).
- Malandrino, A.G., Guerra, D.N., Gonçalves G., Mariani, M. A., Gonzalez, V., 2015 Bolas de Sombra - Análise da tecnologia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MME; EPE, 2019. Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. 2018.—. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. 2019.
- Ocean Sun. Ocean Sun. 2019. <https://oceansun.no/> (acesso em 05 de setembro de 2019).
- REC, 2018. Riding the wave of solar energy: Why floating solar installations are a positive step for energy generation.: NE-18-27, Rev D.2018.
- Rosa-Clot, M, Tina, G.M., Nizetic, S., 2017. Floating photovoltaic plants and wastewater basins: an Australian project. *Procedia Engineering*, 134 ed.: pp. 664-674.
- Sacramento, E.M., Carvalho, P.C.M., Araújo J.C., Riffe, D.B., Corrêa, R.M.C., e Pinheiro Neto, J.S., 2015. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. *IET Renewable Power Generation*.
- Sahu, A., Yadav, N., Sudhakar, K., 2016. Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66: pp. 815-824.
- Santafé, M.R., Soler J.B.T., Romero, F.J.S., Gisbert, P.S.F., Gozávez, J.J.F., Gisbert, C.M.F., Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs. *Energy* vol. 67 (2014): p. 246-255.
- Scotra. 2019. <http://scotra.co.kr> (acesso em 05 de setembro de 2019).
- SECI, 2017. Expression of Interest (EOI) for development of about 10,000 MW Floating Solar PV (FSPV) Projects on Build, Own & Operate basis. New Delhi: Solar Energy Corporation of India Limited.
- SolarisFloat. 2019. <https://www.solarisfloat.com> (acesso em 13 de setembro de 2019).
- . Fazenda Figueiredo – Goias. 2019. <https://www.sunlution.com.br/portfolio-items/fazenda-figueiredo-go/> (acesso em 07 de outubro de 2019).
- Taboada, M.E., Caceres, L., Graber T.A., Galleguillos H.R., Cabeza L.F., Rojas R., 2017. Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling. *Renewable Energy*, vol. 105 : pp. 601-615.
- Vera Y Conde, C.F., Rocha, C.F.D., 2006. Distúrbio no habitat e riqueza e diversidade de pequenos mamíferos em uma área de Mata Atlântica no sudeste do Brasil. *Braz. J. Biol.* 66, nº 4: pp. 983-990.
- World Bank Group, SERIS, ESMAP, 2019. Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report.

TECHNOLOGICAL AND SOCIOENVIRONMENTAL ASPECTS OF FLOATING PV SYSTEMS

Abstract. *Floating PV systems are one more technological option for the use of solar PV source. These systems are being installed in some countries, especially those with land constraints for installation of conventional systems. There are some technological variations for this solution, mainly regarding the floaters, with different structures being proposed. Still, the basic idea is similar: to use a floating platform fixated on the margins or on the water bottom, over which the PV modules are installed. This paper discusses the potential advantages and difficulties for this kind of systems. Some of the main advantages, as efficiency gains, need further study, in order to evaluate if they are enough to compensate some of the challenges, as for example the non-use (on most floaters) of tracking, and the incremental cost comparing to land projects. Socioenvironmental aspects must be evaluated, above all regarding marine life disturbances. Pilot projects operating in the country and abroad may help to answer many of these issues. Considering the higher cost of installation, the LCOE from FPV does not seem competitive in this moment. Monitoring is needed to assess if with the growth of installations worldwide, the mounting structure costs will be reduced up to a level in which there will be competitiveness. Therefore, the evolution of the technology should be followed, allowing its competition with others, without the need of subsidies or dedicated contracts.*

Key words: *Solar Energy, Photovoltaics, Floating Systems*