

Impactos relacionados à implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes em corpos d'água

Jéssica Gouveia Lira^{1*} , Helena Paula de Barros Silva¹ , Claudemiro Lima Júnior¹ 

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco, BR 203, KM 2- S/N - Vila Eduardo, Petrolina – PE, 56328-900, Brasil

*Autora para correspondência: jessicagouveia01@gmail.com

Recebido em 04 de maio de 2021.

Aceito em 25 de outubro de 2021.

Publicado em 11 de novembro de 2021.

Resumo - A energia solar é uma importante fonte de energia renovável e entre as diversas possibilidades de arranjos fotovoltaicos, a energia solar flutuante tem se destacado e está cada vez mais difundida mundialmente. No entanto, é necessário avaliar os possíveis impactos na implantação desses sistemas, especialmente os possíveis efeitos socioambientais. O objetivo desta pesquisa foi realizar uma revisão de literatura sobre os impactos que a implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes pode trazer para os corpos d'água em que foram instalados. Os artigos utilizados para esta pesquisa foram provenientes das bases de dados *ScienceDirect*, *Scopus*, *IEEE Xplore* e *Web of Science*. Para realização dessa busca nas bases de dados, foram utilizadas as palavras chaves “Solar Energy”, “Floating solar”, “Photovoltaics” e “Impacts”. Inicialmente, 34 artigos foram encontrados, 11 artigos na base *ScienceDirect*, 7 artigos na *Scopus*, 2 na *IEEE Xplore* e 14 na *Web of Science*. Foram excluídos os artigos duplicados e os trabalhos que não estavam de acordo com os critérios de inclusão. Após a leitura dos resumos, 10 artigos foram analisados e utilizados para esta revisão. Os estudos incluídos mostraram o quanto os impactos ambientais ainda são pouco estudados. Os impactos sociais decorrentes da instalação desses sistemas não foram analisados.

Palavras-chave: Energia solar. Fotovoltaica flutuante. Impactos ambientais.

Impactos relacionados con la implantación de sistemas fotovoltaicos flotantes en cuerpos de agua

Resumen - La energía solar es una fuente importante de energía renovable y entre las diversas posibilidades de los arreglos fotovoltaicos, la energía solar flotante se ha destacado y está cada vez más extendida a nivel mundial. Sin embargo, es necesario evaluar los posibles impactos en la implementación de estos sistemas, especialmente los posibles efectos socioambientales. El objetivo de esta investigación fue realizar una revisión de la literatura sobre los impactos que la implementación de sistemas fotovoltaicos flotantes puede traer a los cuerpos de agua en donde se han instalado. Los artículos utilizados para esta investigación provienen de las bases de datos *ScienceDirect*, *Scopus*, *IEEE Xplore* y *Web of Science*. Para llevar a cabo esta búsqueda en las bases de datos, se utilizaron las palabras clave “Energía Solar”, “Solar flotante”, “Fotovoltaica” e “Impactos”. Inicialmente, se encontraron 34 artículos, 11 artículos en la base de datos *ScienceDirect*, 7 artículos en *Scopus*, 2 en *IEEE Xplore* y 14 en *Web of Science*. Se excluyeron los artículos duplicados y los trabajos que no cumplían con los criterios de inclusión. Después de leer los resúmenes, se analizaron y utilizaron 10

artículos para esta revisión. Los estudios incluidos han demostrado lo poco que se estudia el impacto ambiental. No se han analizado los impactos sociales derivados de la instalación de estos sistemas.

Palabras Clave: Energía solar. Fotovoltaica flotante. Impactos ambientales.

Impact of the implantation of floating photovoltaic systems in water bodies

Abstract - Solar energy is an important source of renewable energy and, among the various possibilities of photovoltaic arrangements, floating solar energy systems stand out and are increasingly widespread worldwide. However, it is necessary to assess the possible impacts on the implementation of these systems, especially the possible socio-environmental effects. The objective of this research was to carry out a literature review on the impacts that the implantation of floating photovoltaic systems can bring to water bodies in which they were installed. The articles used for this research came from the *ScienceDirect*, *Scopus*, *IEEE Xplore* and *Web of Science* databases. To carry out this search in the databases, the keywords “Solar Energy”, “Floating solar”, “Photovoltaics” and “Impacts” were used. Initially, 34 articles were found, 11 articles from *ScienceDirect* database, 7 articles from *Scopus*, 2 from *IEEE Xplore* and 14 from *Web of Science*. Duplicate articles and works that did not meet the inclusion criteria were excluded. After reading the abstracts, 10 articles were analysed and used for this review. The included studies have shown that the environmental impacts are still understudied. The social impacts resulting from the installation of these systems are yet to be analysed.

Keywords: Solar energy. Floating photovoltaic. Environmental impacts.

Introdução

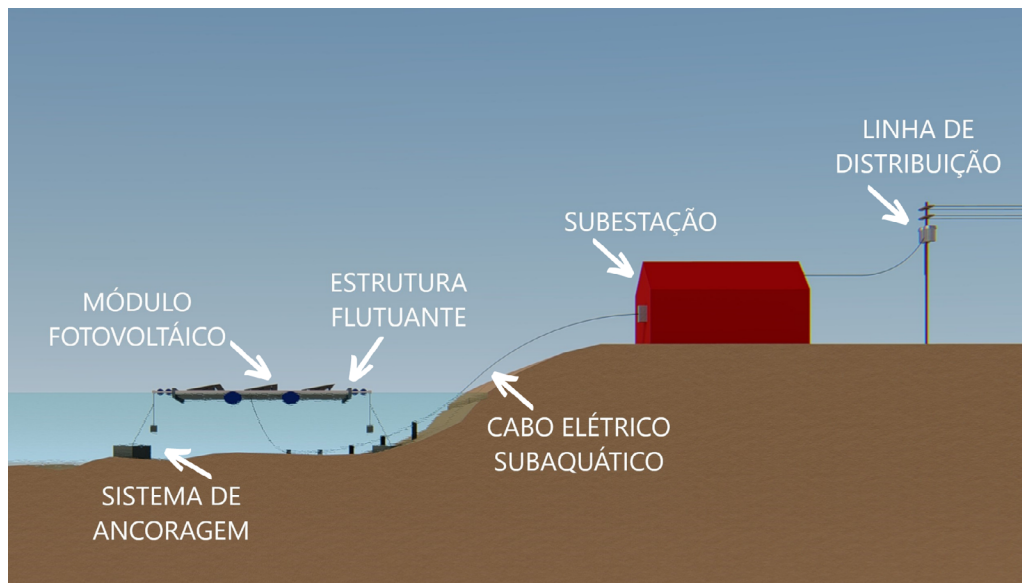
Os sistemas fotovoltaicos flutuantes oferecem novas oportunidades para aumentar a capacidade de geração solar e apresentam vantagens sobre os sistemas usuais baseados em terra (World Bank Group; SERIS; ESMAP 2018). Por exemplo, os sistemas flutuantes apresentam melhor rendimento devido ao resfriamento que a água proporciona nos módulos (Choi; Choi; Lee 2016) e à diminuição da poeira nos painéis, permitindo-lhes gerar mais potência do que os sistemas em terra (Mittal; Saxena; Rao 2017).

No entanto, é necessário avaliar os possíveis impactos na implantação desses sistemas em reservatórios de usinas hidrelétricas, especialmente aos possíveis efeitos socioambientais como interferência nas atividades de pesca, piscicultura, navegação e usos recreativos do corpo d'água, além do impacto na biodiversidade do local (World Bank Group; SERIS; ESMAP 2018).

Descrição da tecnologia

Os sistemas fotovoltaicos flutuantes são resultantes da combinação do sistema solar fotovoltaico convencional (em terra) com a tecnologia das plataformas flutuantes. As usinas fotovoltaicas flutuantes são constituídas por módulos fotovoltaicos, plataformas flutuantes, sistema de ancoragem e cabos elétricos (Figura 1) (Choi 2014).

Figura 1. Esquema de usina solar fotovoltaica flutuante

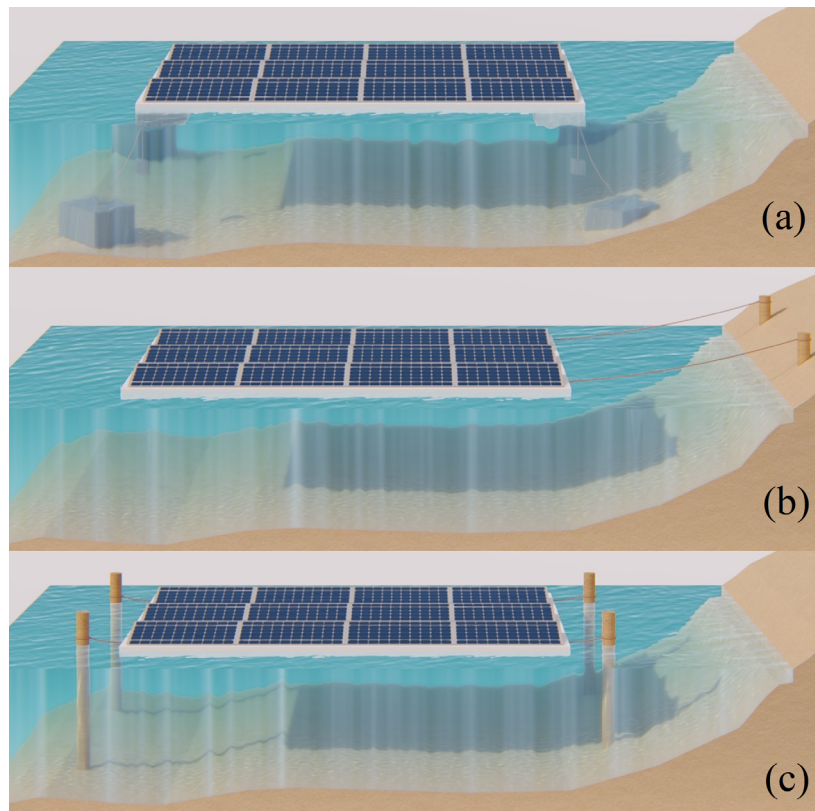


Os módulos fotovoltaicos têm a finalidade de captar a irradiação solar e convertê-la em energia elétrica. As plataformas flutuantes são as estruturas em que os módulos se apoiam, proporcionando estabilidade e flutuabilidade ao sistema. Já o sistema de ancoragem serve para fixar a plataforma flutuante nas margens e/ou no fundo do corpo d'água, proporcionando resistência do sistema à variação do nível d'água do reservatório e à força dos ventos (EPE 2020). Os cabos elétricos geralmente são cabos subaquáticos e servem para levar a energia produzida pelo sistema até à rede de distribuição. Esses cabos devem ser robustos, resistentes a altas temperaturas e possuir uma boa durabilidade (Sahu; Yadav; Sudhakar, 2016).

Os módulos fotovoltaicos podem ser fixados diretamente nos flutuadores, ou apoiados em estruturas metálicas (de modo similar aos sistemas em terra). A primeira opção é a mais comum e está disponível em vários fornecedores, além disso, os módulos fixados diretamente nos flutuadores possuem uma capacidade instalada mundial de várias centenas de megawatts (World Bank Group; SERIS; ESMAP 2018). Os sistemas também podem ser instalados em membranas e tapetes projetados para resistir ao estresse mecânico e a exposição ao sol (EPE 2020).

A plataforma flutuante permanece no lugar devido a um sistema de ancoragem e amarração, cujo projeto depende de fatores como carga do vento, tipo de flutuador, profundidade da água e variabilidade do nível da água. A plataforma flutuante pode ser ancorada de três maneiras: banco de ancoragem ou ancoragem em bloco, ancoragem inferior ou de fundo, e pilar ou estaca (Figura 2). A ancoragem dos blocos é mais adequada a lagoas pequenas e rasas, no entanto, a maioria dos sistemas flutuantes são ancorados no fundo. Independentemente do método, a ancoragem deve ser projetada de forma a manter a instalação no local por 25 anos ou mais. Os cabos de amarração precisam ser selecionados adequadamente para acomodar tensões ambientais e variações no nível da água (World Bank Group; SERIS; ESMAP 2018).

Figura 2. Esquema dos tipos de ancoragem: (a) ancoragem inferior ou de fundo; (b) banco de ancoragem ou ancoragem em bloco; (c) pilar ou estaca



Experiências internacionais e projetos pilotos no Brasil

O Japão foi o país pioneiro na exploração desta tecnologia e construiu o primeiro sistema fotovoltaico flutuante em 2007, após isso, vários países começaram a testar em pequena escala para fins de pesquisa, como França, Itália, Coreia do Sul, Espanha e Estados Unidos. Em 2008, os Estados Unidos construíram a primeira instalação comercial, um sistema instalado na Califórnia com capacidade de geração de energia de 175 kWp, o sistema foi escolhido para evitar a ocupação de terras mais utilizadas para o cultivo de uvas (World Bank Group; SERIS; ESMAP 2018).

Para os Estados Unidos, um estudo realizou uma estimativa do potencial da tecnologia fotovoltaica flutuante em reservatórios artificiais do país e os resultados demonstraram o potencial da tecnologia em contribuir significativamente para o setor elétrico dos EUA, mesmo usando premissas conservadoras. A pesquisa identificou 24.419 corpos d'água artificiais adequados para a geração de energia e cobrindo apenas 27% desses corpos d'água, os sistemas fotovoltaicos flutuantes poderiam produzir quase 10% da geração nacional atual. Muitos desses corpos d'água elegíveis estão em áreas com escassez de água, com altos custos de aquisição de terras e altos preços de eletricidade, sugerindo vários benefícios da tecnologia fotovoltaica flutuante (Spencer et al. 2019).

Em fevereiro de 2020, o instituto Fraunhofer para Sistemas de Energia Solar analisou o potencial técnico de sistemas fotovoltaicos flutuantes em lagos de antigas minas de lignito na Alemanha, estimando uma capacidade fotovoltaica de 56 GWp. Após subtrair a área utilizada para atividades recreativas, turismo e áreas de conservação, o potencial econômico final foi de 2,74 GWp (Fraunhofer ISE 2020).

Recentemente, a China instalou usinas com capacidade de dezenas e até centenas de megawatts. A primeira usina maior que 10 MWp foi instalada em 2016 e em 2018 o mundo viu as primeiras usinas maiores que 100 MWp. A maioria dessas grandes usinas recentes da China foram instaladas em lagos de mineração. Estima-se que ocorra um crescimento acelerado no mercado nos próximos anos, influenciado pela China e pela Coreia do Sul, e com crescimento importante de outros mercados, com destaque para a Índia. Com o surgimento desses novos mercados, a capacidade solar flutuante instalada cumulativa e as novas adições anuais estão crescendo exponencialmente (World Bank Group; SERIS; ESMAP 2018).

No Brasil já existem projetos-pilotos que utilizam tecnologia solar fotovoltaica flutuante associada a usinas hidrelétricas e os resultados dessas pesquisas serão importantes para proporcionar maior entendimento dos benefícios desta tecnologia, que ainda é pouco estudada (EPE 2020).

O maior projeto piloto em operação está localizado no reservatório da usina hidrelétrica de Sobradinho, na Bahia (Figura 3), o sistema foi inaugurado em julho de 2019 e possui capacidade de 1 MWp. O projeto piloto que será instalado no reservatório da usina hidrelétrica de Balbina, no Amazonas, ainda está em fase de projeto e tem capacidade prevista de 2,5 MWp (EPE 2020).

Figura 3. Projeto piloto de usina solar fotovoltaica flutuante no reservatório da usina hidrelétrica de Sobradinho



Em 2016, a cidade de Cristalina, em Goiás, recebeu o primeiro projeto piloto da tecnologia implementado em uma propriedade rural e conectado diretamente à rede de energia. Em uma lagoa artificial da propriedade, foram instalados 1.150 módulos fotovoltaicos com potência de 304 kWp (Sunlution 2016). Em 2019, uma usina solar flutuante foi instalada sobre o reservatório da usina hidrelétrica Eliezer Batista, no município de Aimorés, em Minas Gerais. A usina faz parte de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e possui capacidade de geração de 100 kWp (Alsol 2019).

Impactos ambientais

Apesar dos sistemas flutuantes produzirem energia limpa e renovável, a implantação e operação podem provocar sérios impactos socioambientais (Bezerra et al. 2017). Para isso, é necessário que

sejam analisadas a flora, a fauna (Pereira et. al 2019) e a comunidade do local em que os sistemas serão instalados.

Os impactos ambientais dos sistemas fotovoltaicos, instalados em terra ou em corpos d'água, normalmente não são nulos, pois o processo de fabricação dos módulos fotovoltaicos e de todos os insumos que compõem o sistema requerem grandes quantidades de energia, alto consumo de água e emitem gases de efeito estufa (Clemons et al. 2021). Por outro lado, quando os sistemas fotovoltaicos flutuantes estão na fase de operação, a tecnologia apresenta impactos positivos por não emitir poluição sonora; reduzir o crescimento de algas e, conseqüentemente, diminuir a eutrofização; produzir energia elétrica limpa e renovável; poupar os recursos hídricos em virtude da diminuição das taxas de evaporação e requerer menor quantidade de água para limpeza de módulos fotovoltaicos, pois como o sistema é posicionado longe do solo, os efeitos da poeira são minimizados (Cazzaniga et al. 2018). Além disso, os sistemas flutuantes permitem que terras valorizadas sejam poupadas para agricultura, mineração, turismo e outras atividades devido à instalação dos módulos fotovoltaicos ser sobre corpos d'água (Pimentel da Silva e Branco 2018).

Os estudos a respeito dos impactos ambientais dos sistemas flutuantes são bastantes limitados (Ziar et al. 2020). A maior parte dos trabalhos científicos encontrados nas bases de dados mais conhecidas tem se concentrado nos avanços tecnológicos dos sistemas flutuantes, e não nos impactos que essa tecnologia pode causar ao meio ambiente (Ranjbaran et al. 2019).

Liu et al. (2018) alertam que esses sistemas podem impactar a qualidade da água a longo prazo devido à degradação do material, no entanto não realizam experimento científico para analisar esse impacto. Duas revisões publicadas recentemente, uma por Ranjbaran et al. (2019) e outra por Sahu et al. (2016), após analisarem cerca de 200 trabalhos, apontam que a maioria dos estudos disponíveis sobre a tecnologia flutuante destaca principalmente os aspectos técnicos e de implementação, bem como a avaliação técnico-econômica desses sistemas. As duas publicações constataram a necessidade de mais estudos para que se possa compreender melhor os impactos ambientais decorrentes da instalação de sistemas fotovoltaicos flutuantes (Haas et al. 2020).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo apresentar, por meio de uma revisão sistemática de literatura, os impactos que a implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes pode trazer para os corpos d'água em que foram instalados.

Material e métodos

A revisão de literatura sobre a tecnologia fotovoltaica flutuante e seus impactos socioambientais foi desenvolvida através da metodologia dos Principais Itens a Relatar para Revisões Sistemáticas e Meta-Análises – PRISMA, pelo fato de utilizar métodos sistemáticos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar criticamente as pesquisas mais relevantes sobre o tema escolhido (Liberati et al. 2009). A pergunta norteadora que conduziu esse estudo foi: “Quais os impactos relacionados à implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes em corpos d'água?”

No período de dezembro de 2020 e janeiro de 2021, foi realizada uma busca eletrônica nas bases de dados *ScienceDirect*, *Scopus*, *IEEE Xplore* e *Web of Science*. A escolha dessas bases de dados se deu em virtude da qualidade que os trabalhos publicados e disponibilizados nelas possuem, além de serem bases que se destacam no meio científico internacional. Somando as quatro bases utilizadas, elas

possuem mais de 5 milhões de documentos entre periódicos, normas técnicas, anais de congressos e conferências (CAPES 2021).

Para realização dessa busca nas bases de dados, foram utilizadas as palavras chaves “*Solar Energy*”, “*Floating solar*”, “*Photovoltaics*” e “*Impacts*” nesta respectiva ordem, separados pelo operador booleano “AND”. Em seguida, foi realizada a pesquisa pelos artigos, a fim de buscar na literatura trabalhos sobre a tecnologia fotovoltaica flutuante e seus impactos.

Critérios de inclusão e exclusão

Durante as buscas nas bases *ScienceDirect* e *Scopus*, optou-se por restringir a procura das palavras chaves citadas anteriormente nos campos do título, resumo ou palavras-chave especificadas pelo autor, com a finalidade de se obter resultados mais refinados. Para as bases *IEEE Xplore* e *Web of Science*, a busca não foi limitada pela localização das palavras chaves em pontos específicos do texto. Foram selecionados apenas artigos científicos relacionados a sistemas fotovoltaicos flutuantes e seus impactos, com publicações entre os anos de 2011 e 2021. Durante a busca, não foram excluídos artigos por idioma, no entanto, foi utilizado o filtro para artigos de revisão e artigos de pesquisa, excluindo publicações no formato de capítulos de livros, resumos de artigos e artigos de congressos.

Ainda que essa revisão tenha utilizado quatro bases de dados importantes, possivelmente alguns estudos relevantes podem não ter sido incluídos nesta seleção, pois, os critérios de exclusão durante a seleção dos artigos podem ter levado a extração de alguns estudos que não apresentavam uma descrição clara, dificultando a seleção. É importante ressaltar que a utilização de palavras chaves diferentes das que foram utilizadas neste processo de busca nas bases de dados modifica toda a metodologia, resultando em trabalhos diferentes aos que foram utilizados para essa revisão.

Análise dos dados

Os artigos resultantes do processo de busca nas bases de dados foram dispostos em planilhas no Excel. Primeiramente, foram inseridos na planilha os seguintes dados dos trabalhos: autores, título, a base de dados em que o trabalho foi extraído, o tipo do trabalho (artigo de pesquisa ou artigo de revisão) e a nota atribuída a partir da leitura do título (trabalhos com nota 0 foram excluídos do processo e trabalhos com nota 1 seguiram para análise do resumo). Antes da atribuição dessas notas, foi realizada a aplicação de filtros de duplicidade, para excluir artigos em duplicata. Após a análise de duplicidade, foi realizada a leitura dos títulos dos trabalhos e os artigos que não continham termos referentes a sistemas fotovoltaicos flutuantes foram excluídos.

Os trabalhos que, após a leitura do título e do resumo, não abordavam os impactos dos sistemas fotovoltaicos flutuantes, foram excluídos. Em seguida, os artigos que seguiram os critérios de elegibilidade foram lidos e analisados na íntegra.

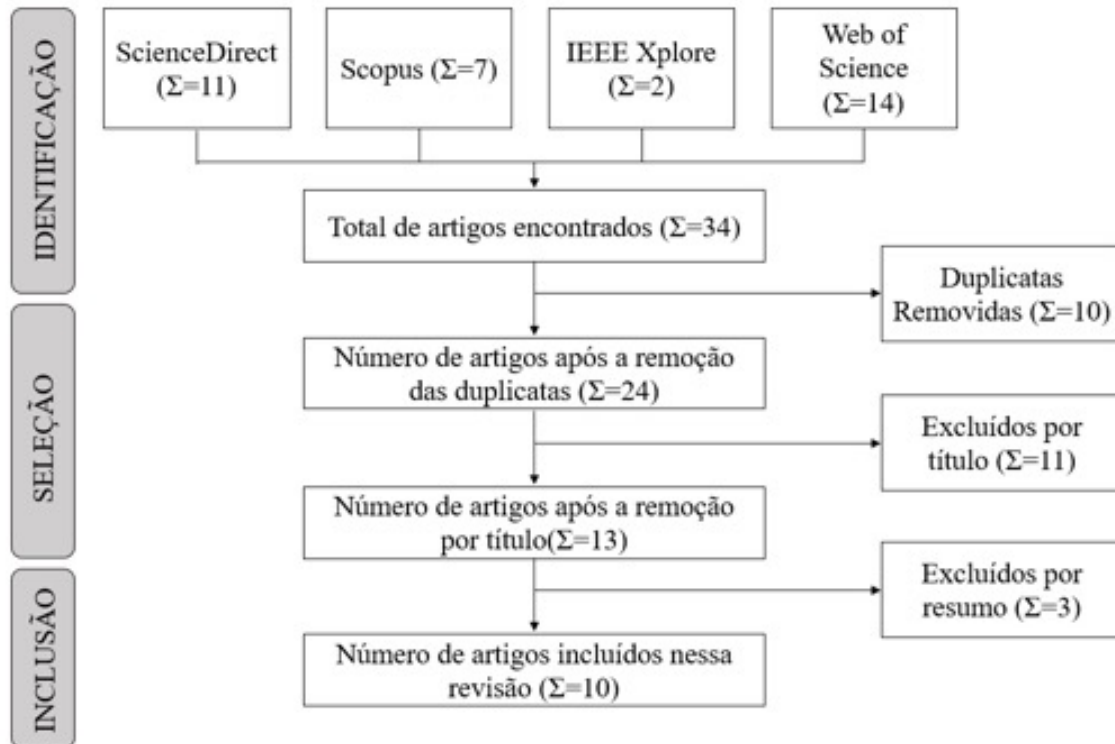
Posteriormente, os impactos analisados e estudados pelos autores foram selecionados para a sintetização qualitativa.

Resultados

Após a realização da busca nas bases de dados, resultou em 11 artigos na base *ScienceDirect*, 7 artigos na *Scopus*, 2 na *IEEE Xplore* e 14 na *Web of Science*, totalizando em 34 artigos. Em seguida,

10 artigos foram excluídos por duplicidade, 11 foram removidos por título e 3 foram excluídos após leitura do resumo. Por fim, 10 artigos foram utilizados para a revisão, como descrito na Figura 4.

Figura 4. Fluxograma da seleção dos artigos para a revisão baseado no Método PRISMA



A Tabela 1 demonstra os impactos que cada estudo analisou ou abordou de forma mais superficial. As novas tecnologias desenvolvidas só devem ser implementadas se apresentarem baixo impacto negativo ao meio ambiente, por isso, analisar esses impactos é imprescindível para qualquer empreendimento. Gorjian et al. (2021) e Trapani e Santafé (2015) são artigos de revisão, por isso as colunas com informações sobre o país e o ano em que ocorreu o experimento não estão preenchidas. A coluna com informação sobre o país em que foi realizado o experimento de Farfan e Breyer (2018) não está preenchida pois os autores utilizaram informações de um banco de dados global.

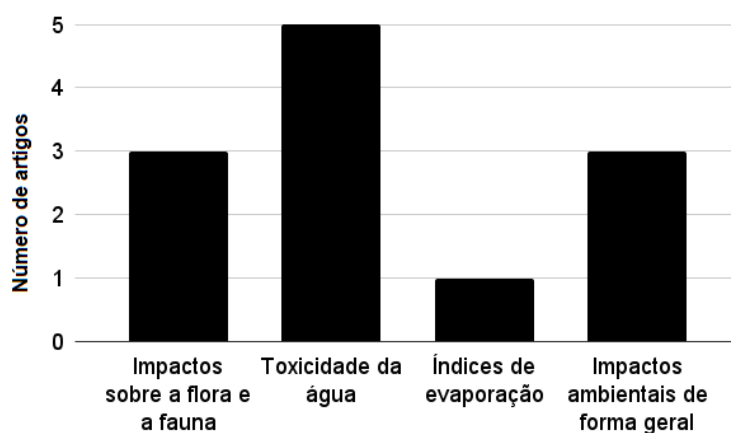
Tabela 1. Impactos abordados e/ou analisados pelos trabalhos

Autor	País	Ano	Impactos analisados
(Gorjian et al. 2021)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • Impactos sobre a flora e a fauna • Impacto Visual • Poluição sonora e atmosférica durante construção • Contaminação da água pelo uso de produtos químicos durante a manutenção
(Haas et al. 2020)	Chile	2020	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da luz incidente no reservatório • Interferência no desenvolvimento de algas

Autor	País	Ano	Impactos analisados
(Clemons et al. 2021)	Tailândia	2021	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de água e emissão de gases de efeito estufa durante a produção dos insumos • Toxicidade para ecossistemas aquáticos
(Farfan e Breyer 2018)	-	2018	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto zero
(Bontempo Scavo et al. 2021)	Itália	2018	<ul style="list-style-type: none"> • Alteração nos índices de evaporação da bacia hidrográfica
(Cagle et al. 2020)	EUA	2019	<ul style="list-style-type: none"> • Proposta de métricas para quantificar os impactos ambientais em corpos d'água que possuem instalações de sistemas flutuantes
(Mathijssen et al. 2020)	Holanda	2020	<ul style="list-style-type: none"> • Lixiviação de metais pesados
(Ziar et al. 2020)	Holanda	2019	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade da água • Variação de temperatura da água • Diminuição da biomassa das plantas aquáticas • Quantidade de oxigênio dissolvida
(Liu et al. 2018)	Singapura	2016	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminação de corpos d'água devido a elementos tóxicos em decorrência da degradação do material dos módulos
(Trapani e Santafé 2015)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação preliminar de impacto ambiental

Os impactos podem ser classificados de maneira resumida em 4 grupos: impactos sobre a flora e a fauna, toxicidade da água, índices de evaporação e estudos de impactos ambientais de forma geral. Impactos sobre a flora e a fauna foram abordados em 3 trabalhos, são eles: Gorjian et al. (2021), Haas et al. (2020) e Ziar et al. (2020). A toxicidade da água, seja ela decorrente do uso de produtos químicos utilizados nas limpezas dos módulos fotovoltaicos ou pela lixiviação de metais pesados dos materiais do sistema, foi analisada em 5 artigos, são eles: Gorjian et al. (2021), Clemons et al. (2021), Mathijssen et al. (2020), Ziar et al. (2020) e Liu et al. (2018). Os índices de evaporação foram estudados por Bontempo Scavo et al. (2021) e estudos de impactos ambientais de forma geral foram abordados em 3 trabalhos, são eles: Cagle et al. (2020), Trapani e Santafé (2015) e Farfan e Breyer (2018), como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5. Distribuição dos impactos nos trabalhos analisados.



Discussão

Apesar dos impactos ambientais que a instalação de sistemas fotovoltaicos flutuantes pode ocasionar nos reservatórios, e no ecossistema presente nesses corpos d'água, ainda serem pouco explorados, pesquisadores de diferentes regiões vêm buscando entender mais esses efeitos, como observado na Tabela 01. Os impactos vão desde a produção dos insumos, durante a construção e instalação das usinas, e na manutenção dos sistemas até a fase de descomissionamento.

Gorjian et al. (2021) alertam sobre a necessidade de buscar locais em que os impactos sobre a flora, a fauna, o ar e a água sejam os mais baixos possíveis, pois, tanto na fase de construção quanto na de operação, os ecossistemas locais podem ser alterados. Logo, áreas que possuam espécies de animais protegidas e restrições ambientais não são recomendadas. Em relação ao impacto visual, os autores apresentam o sistema de flutuação utilizando bambu, proposto por Rosa-Clot e Tina (2018), que minimiza o impacto visual e poluente por serem feitos de matérias-primas naturais com uma vida útil de mais de 10 anos na água. O trabalho também explana sobre a poluição sonora e atmosférica em decorrência do trânsito de veículos pesados ou barcos para o transporte de materiais e construção da usina flutuante, no entanto, esse ruído gerado está em níveis muito baixos quando comparados às diretrizes de ruído industrial e de ruído ocupacional, portanto, não causa impactos ambientais, de saúde ou de segurança. Além disso, o impacto do ruído é realmente insignificante porque a duração da fase de construção é muito mais curta do que o ciclo de vida da usina, que é cerca de 25 a 30 anos.

Outro fator abordado por Gorjian et al. (2021) é a toxicidade dos produtos químicos utilizados nas limpezas dos módulos fotovoltaicos, podendo afetar a fauna e a flora durante um longo período. A potencial contaminação da água devido ao uso dessas substâncias pode resultar na mortalidade de peixes e outras espécies aquáticas ou na alteração da qualidade da água, com isso, é necessário limitar ou até mesmo alterar os métodos de limpeza nos sistemas flutuantes, não utilizando materiais químicos que podem contaminar e poluir o reservatório. Ademais, é importante salientar que os sistemas flutuantes requerem menos água para limpeza, pois o sistema é posicionado longe do solo e os efeitos da poeira carregada pelo vento também são minimizados.

Haas et al. (2020) examinaram o impacto dos sistemas fotovoltaicos flutuantes em termos de controle de florescências de microalgas no reservatório de Rapel, uma usina hidrelétrica no centro do Chile. Os autores analisaram a influência do sombreamento ocasionado pelos módulos fotovoltaicos flutuantes, a partir de um modelo numérico que simula a hidrodinâmica de um corpo d'água, permitindo examinar como o sistema, ao reduzir a luz incidente, afeta o desenvolvimento da biomassa de microalgas. O trabalho conclui que instalações pequenas não obtiveram sucesso para prevenir a proliferação de algas, já sistemas com tamanhos moderados podem efetivamente evitar florações, diminuindo a eutrofização. Os resultados mostraram que corpos d'água com áreas extensas de módulos fotovoltaicos eliminam as algas completamente, o que pode ameaçar a ecologia do lago. Combinando o aspecto ecológico com o aspecto econômico, o estudo evidenciou que a cobertura ideal da superfície do reservatório pelos módulos deveria ser cerca de 40 a 60%. Nesse intervalo, é possível manter as concentrações de algas dentro das recomendações sem comprometer a geração de energia pela hidrelétrica.

Clemons et al. (2021) examinaram os impactos ambientais dos sistemas fotovoltaicos flutuantes comparados a uma aplicação fotovoltaica convencional instalada em terra, usando uma avaliação do

ciclo de vida (Life-cycle assessment - LCA). Essa avaliação analisou os impactos ambientais durante a produção dos módulos fotovoltaicos, no decorrer da fabricação dos flutuadores, do sistema de montagem e nas manutenções do sistema ao longo da vida. Os autores recomendam que a redução do consumo de água e das emissões de gases de efeito estufa durante a produção dos insumos dos sistemas flutuantes sejam priorizados para reduzir os impactos ambientais. Os resultados das análises dos impactos apontam uma toxicidade para os ecossistemas de água doce do início ao fim do seu ciclo de vida, no entanto, o sistema mostrou efeitos muito baixos na toxicidade para humanos. Por fim, a avaliação do ciclo de vida do sistema possibilitou analisar os efeitos da tecnologia no meio ambiente e na saúde humana, e este estudo mostrou que durante a vida útil de trinta anos do sistema, a usina flutuante teve cerca de metade do impacto na saúde humana quando comparadas às usinas em terra, embora usando consideravelmente mais recursos.

Farfan e Breyer (2018) estudaram a possibilidade de sistemas híbridos de usinas hidrelétricas e usinas fotovoltaicas, a partir da utilização de um banco de dados global de reservatórios e barragens. Os autores propõem que a demanda de eletricidade seja suprida a partir da geração de energia solar durante os horários de pico de irradiação, enquanto equilibra as redes com energia hidrelétrica durante tempos de baixa ou nenhuma irradiação. Os pesquisadores classificam os reservatórios hidrelétricos como uma área de impacto zero para implantação de usinas fotovoltaicas.

Bontempo Scavo et al. (2021) analisaram o efeito de usinas fotovoltaicas flutuantes na evaporação de bacias hidrográficas a partir de modelos numéricos e depois testaram a confiabilidade dos modelos propostos em um estudo de caso utilizando o Lago Biviere em Lentini, na Itália. O estudo demonstrou que a quantidade de água evaporada não depende só da porcentagem da superfície da água coberta, mas também das características dos sistemas flutuantes. Os sistemas flutuantes suspensos, ou seja, aqueles que não estão completamente em contato com a superfície da água, quando instalados em 30% da área da bacia, atingem uma redução da taxa de evaporação em cerca de 18%. Já os sistemas que cobrem inteiramente a superfície abaixo dos módulos e os módulos flexíveis em contato direto com água atingem uma redução de 49% e 42%, respectivamente. No entanto, os autores não avaliaram se a diminuição das taxas de evaporação pode alterar as condições do microclima ou do ecossistema local.

O estudo de Cagle et al. (2020) viabilizou uma estrutura padronizada de métricas para calcular e comparar a economia de terras a partir de implantação de fotovoltaica flutuante (poupando terras necessárias para a agricultura e conservação) e a eficiência de uso desses sistemas, essas métricas podem ser empregadas para quantificar os impactos ambientais em corpos d'água. Neste trabalho, foram comparados os atributos tecnohidrológicos e espaciais de quatro sistemas flutuantes que possuíam diferentes regimes climáticos, depois definiram e quantificaram a economia de terra e a eficiência do uso da superfície da água de cada sistema. Em seguida, calcularam a transformação da superfície da água a partir dos dados da primeira instalação comercial de fotovoltaica flutuante, localizada na Califórnia. Os quatro sistemas pouparam 59.555 m² de terreno e apresentaram uma proporção média de preservação de terreno de 2,7: 1 m² em comparação aos sistemas montados em terra. Os autores consideram que este conjunto de métricas possa ser fundamental para compreender os impactos potenciais da tecnologia além do quesito de preservação da terra e uso da água, mas também para analisar as possíveis implicações ambientais e ecológicas.

Mathijssen et al. (2020) analisaram os impactos que as instalações dos sistemas flutuantes podem causar na qualidade da água dos reservatórios, para isso, foi avaliada a lixiviação de várias substâncias

e seus possíveis efeitos. Foram realizados testes de lixiviação e, dos 200 compostos testados, apenas alguns metais pesados foram encontrados em concentrações mais altas, ainda assim, as concentrações são várias vezes mais baixas do que o padrão para água potável. Alumínio, cobre, manganês e zinco são alguns exemplos de substâncias que lixiviam das tubulações e do selante utilizado nas instalações. Os autores alertam que, apesar de ser bastante improvável que esses metais pesados aumentem as concentrações detectáveis na água potável, as perspectivas dos danos dessa lixiviação a longo prazo ainda são incertas e, portanto, devem ser monitoradas.

Ziar et al. (2020) realizaram medições nas proximidades do projeto piloto flutuante instalado em uma lagoa de águas pluviais, localizada em Weurt, no leste da Holanda, a fim de compreender os efeitos dos sistemas fotovoltaicos flutuantes no ecossistema. Foi analisada a qualidade da água, a variação de temperatura da água, a biomassa das plantas aquáticas e a quantidade de oxigênio dissolvida. Para avaliação da qualidade da água, foram medidos os níveis de nitrogênio total, fósforo total, clorofila-a, e clorofila cianobacteriana porém, esse monitoramento não apresentou diferenças significativas nos parâmetros relevantes de qualidade da água. Em relação a temperatura, não houve alteração nos períodos de inverno, no entanto, a temperatura da água sob os sistemas flutuantes nos meses de verão diminuíram em média 0,8 °C, resultando em menos evaporação local e aumento na proliferação do fitoplâncton. Uma biomassa significativamente menor de plantas aquáticas foi observada sob os módulos flutuantes, mostrando que, apesar de ser possível o crescimento da vegetação sob os sistemas fotovoltaicos, ela foi reduzida por um fator três. Em consequência disso, observaram uma diminuição nas concentrações de oxigênio na coluna d'água que pode ser atribuído ao aumento do consumo de oxigênio ou à diminuição da produção por meio do processo de fotossíntese. Baixas concentrações de oxigênio podem levar a efeitos prejudiciais para a biota, levando à morte de peixes em grande escala, entretanto, não foi encontrada anoxia extrema sob os sistemas no local de estudo.

Liu et al. (2018) estudaram a viabilidade econômica e técnica de um projeto piloto no reservatório Tengeh, localizado em Singapura, para implantação do sistema em larga escala. Os autores advertem que, apesar do estudo dos impactos econômicos e ambientais serem necessários, não estão no escopo do artigo. Ainda assim, os autores alertam sobre o risco de contaminação por elementos tóxicos de corpos d'água a longo prazo devido à degradação do material.

Trapani e Santafé (2015) fizeram uma revisão de vários projetos que utilizaram a tecnologia fotovoltaica flutuante em corpos d'água fechados, como reservatórios, lagoas e pequenos lagos durante os anos de 2007 e 2013. Os autores também alertam sobre a necessidade de fazer, antes da instalação dos sistemas, uma avaliação preliminar de impacto ambiental para delinear quaisquer perigos potenciais para o ecossistema do lago.

Conclusão

Os estudos incluídos nesta revisão mostraram o quanto a análise dos impactos ambientais ainda é pouco estudada, apesar de ser notória sua necessidade. Alguns trabalhos analisaram os impactos ao meio ambiente de forma bastante superficial. Além disso, os resultados obtidos nos artigos apresentaram, muitas vezes, proporções diferentes, que podem ser explicadas devido às peculiaridades de cada reservatório e de cada região.

A partir dos artigos analisados neste trabalho, foi possível apontar alguns impactos que a implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes pode trazer para os corpos d'água em que foram instalados. Dentre esses impactos estão incluídos impactos sobre a flora e a fauna aquática local, poluição sonora e atmosférica durante construção, contaminação da água pelo uso de produtos químicos durante a manutenção, alteração nos índices de evaporação da bacia hidrográfica e alteração na qualidade da água devido a lixiviação de metais pesados encontrados em alguns materiais do sistema.

Como sugestão de pesquisas e trabalhos futuros, os estudos deverão analisar não somente os impactos ambientais resultantes da instalação dos sistemas flutuantes, mas também, é imprescindível que sejam estudados os impactos sociais que os sistemas flutuantes podem acarretar. Muitos reservatórios são utilizados para usos recreativos, atividades de turismo, navegação, além de contribuir para renda de muitas famílias da comunidade do local a partir de atividades de pesca e piscicultura.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco.

Participação dos autores: JGL - concepção, levantamento dos dados, análise e interpretação dos artigos utilizados na revisão e elaboração do manuscrito; HPBS - revisão crítica do manuscrito; CLJ - concepção, orientação e treinamento para realização da revisão sistemática e revisão crítica do manuscrito.

Aprovação ética ou licenças de pesquisa: não houve necessidade de licenças.

Disponibilidade dos dados: Não estão disponíveis em nenhuma base de dados ou repositórios.

Fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Conflito de Interesses: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Referências

ALSOL. 2019. Alsol investe em usina solar flutuante com tecnologia 100% nacional. Disponível em: <<https://www.alsolenergia.com.br/2019/10/04/usina-solar-flutuante/>>. Acesso em: 29 dez. 2020.

Bezerra MBC, Carvalho DB, Lopes WGR, Sousa TJS, Santos FCV, Guzzi A. 2017. Percepção dos impactos socioambientais decorrentes da implantação do complexo eólico Delta do Parnaíba. *Gaia Scientia* 11(1). <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2017v11n1.32496>

Bontempo Scavo F, Tina GM, Gagliano A, Nižetić S. 2021. An assessment study of evaporation rate models on a water basin with floating photovoltaic plants. *International Journal of Energy Research* 45(1): 167–188. <https://doi.org/10.1002/er.5170>

Cagle AE, Armstrong A, Exley G, Grodsky SM, Macknick J, Sherwin J, Hernandez RR. 2020. The land sparing, water surface use efficiency, and water surface transformation of floating photovoltaic solar energy installations. *Sustainability (Switzerland)* 12(19): 1–22. <https://doi.org/10.3390/su12198154>

CAPES. Periódicos Capes. 2021. Informação: Detalhe da Base. Disponível em: <<http://buscador-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/V?RN=292768144>>. Acesso em: 23 jan. 2021.

Cazzaniga R, Cicu M, Rosa-Clot M, Rosa-Clot P, Tina GM, Ventura C. 2018. Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81: 1730–1741. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.269>

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(1): 75–84. <https://doi.org/10.14257/ijseia.2014.8.1.07>

Choi Y-K, Choi WS, Lee JH. 2016. Empirical research on the efficiency of floating PV systems. *Science of Advanced Materials* 8(3): 681–685.

Clemons SKC, Salloum CR, Herdegen KG, Kamens RM, Gheewala SH. 2021. Life cycle assessment of a floating photovoltaic system and feasibility for application in Thailand. *Renewable Energy* 168: 448–462. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.082>

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. 2020. Solar Fotovoltaica Flutuante - Aspectos Tecnológicos e Ambientais relevantes ao planejamento (EPE-DEE-NT-016/2020-r0).

Farfan J, Breyer C. 2018. Combining floating solar photovoltaic power plants and hydropower reservoirs: A virtual battery of great global potential. *Energy Procedia* 155: 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.038>

Fraunhofer ISE. 2020. Fraunhofer ISE Analyzes Potential of Solar Power Plants Located on Pit Lakes in Former Lignite Mines. Press Release. Freiburg, Alemanha.

Gorjian S, Sharon H, Ebadi H, Kant K, Scavo FB, Tina GM. 2021. Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems. *Journal of Cleaner Production* 278: 124285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124285>

Haas J, Khalighi J, de la Fuente A, Gerbersdorf SU, Nowak W, Chen PJ. 2020. Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility. *Energy Conversion and Management* 206. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112414>

Liberati A, Altman DG, Tetzlaff J, Mulrow C, Gøtzsche PC, Ioannidis, JPA, Clarke M, Devereaux PJ, Kleijnen J, Moher D. 2009. The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions: Explanation and Elaboration. *PLoS Medicine* 6(7): e1000100. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>

Liu H, Krishna V, Lun Leung J, Reindl T, Zhao L. 2018. Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 26(12): 957–967. <https://doi.org/10.1002/pip.3039>

Mathijssen D, Hofs B, Spierenburg-Sack E, Vanasperen R, Vanderwal B, Vreeburg J, Ketelaars H. 2020. Potential impact of floating solar panels on water quality in reservoirs; pathogens and leaching. *Water Practice and Technology* 15(3): 807–811. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.062>

Mittal D, Saxena BK, Rao KVS. 2017. Floating solar photovoltaic systems: An overview and their feasibility at Kota in Rajasthan. In 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 1-7. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074182>

Pereira OA, Ribeiro ASN, Santos SS, Siqueira AJS, Nascimento MS, Santos, FCV, Guzzi A. 2019. Diversidade de aves em parques eólicos na APA Delta do Parnaíba, Nordeste, Brasil. *Gaia Scientia* 13(4). <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2019v13n4.44698>

Pimentel da Silva GD, Branco DAC. 2018. Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. *Impact Assessment and Project Appraisal* 36(5): 390–400. <https://doi.org/10.1080/14615517.2018.1477498>

Ranjbaran P, Yousefi H, Gharehpetian GB, Astaraei FR. 2019. A review on floating photovoltaic (FPV) power generation units. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 110: 332–347. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.015>

Rosa-Clot M, Tina GM. 2018. Floating Plants and Environmental Aspects. In: *Submerged and Floating Photovoltaic Systems*. Elsevier, p. 185–212. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812149-8.00009-0>

Sahu A, Yadav N, Sudhakar K. 2016. Floating photovoltaic power plant: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66: 815–824. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051>

Spencer RS, Macknick J, Aznar A, Warren A, Reese MO. 2019. Floating Photovoltaic Systems: Assessing the Technical Potential of Photovoltaic Systems on Man-Made Water Bodies in the Continental United States. *Environmental Science and Technology* 53(3): 1680–1689. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04735>

SUNLUTION. 2016. Fazenda Figueiredo – Goiás. Disponível em: <<https://www.sunlution.com.br/portfolio-items/fazenda-figueiredo-go/>>. Acesso em: 30 dez. 2020.

Trapani K, Santafé MR. 2015. A review of floating photovoltaic installations: 2007-2013. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 23(4): 524–532. <https://doi.org/10.1002/pip.2466>

World Bank Group, SERIS, ESMAP. 2018. Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report. Executive Summary (English). Washington, D.C.: World Bank Group. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/en/579941540407455831/Floating-Solar-Market-Report-Executive-Summary>>. Acesso em: 30 dez. 2020.

Ziar H, Prudon B, Lin FY, Roeffen B, Heijkoop D, Stark T, Teurlinx S, de Senerpont Domis L, Goma EG, Extebarria JG, Alavez IN, van Tilborg D, van Laar H, Santbergen R, Isabella O. 2020. Innovative floating bifacial photovoltaic solutions for inland water areas. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 1–19. <https://doi.org/10.1002/pip.3367>



Esta obra está licenciada com uma *Licença Creative Commons Atribuição Não-Comercial 4.0 Internacional*.