

Viabilidade técnica para implantação de um sistema solar fotovoltaico flutuante em um reservatório do semiárido brasileiro

Technical availability for implantation of a floating photovoltaic solar system in a Brazilian semi-arid reservoir

Yorrana Coutinho Porto
yorrnacoutinho@gmail.com
Universidade de Fortaleza
(Unifor)

Brígida Miola
bmiola@unifor.br
Universidade de Fortaleza
(Unifor)

Francisca Dayane Carneiro Melo
dayanecarneiro@unifor.br
Universidade de Fortaleza
(Unifor)

Francisco de Assis Leandro Filho
leandro.filho@ifce.edu.br
Instituto Federal do Ceará
(IFCE)

Rodrigo Alves Patrício
rodrigo.patricio@unifor.br
Universidade de Fortaleza
(Unifor)

Resumo

O uso dos sistemas fotovoltaicos flutuantes vem ganhando espaço em diversos países por se tratar de uma nova estratégia que, além da geração de energia, evita a evaporação dos recursos hídricos e, por efeito do resfriamento dos módulos fotovoltaicos, contribui para o aumento na eficiência de conversão. Para a implantação desse tipo de sistema fotovoltaico, não é necessária aquisição de terras, já que existe infraestrutura necessária nos reservatórios. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade técnica da implantação de um sistema fotovoltaico flutuante no reservatório Castanhão-CE. Para isso, foi, inicialmente, feito o dimensionamento do reservatório, e o software *PVsyst*, versão 6.62, foi utilizado para calcular a geração de energia gerada, permitindo a estimativa do potencial energético do reservatório e a energia produzida, além de dados como emissões evitadas de CO₂. Como resultados principais, obteve-se o valor total de potência instalada de até 5590 MWp, correspondente a uma produção anual de energia elétrica de 9256 MWh/ano e 2129.3 tCO₂ de emissões evitadas. Esses resultados demonstram o elevado potencial da instalação de um sistema fotovoltaico flutuante no local, com a possibilidade de o sistema fornecer parte da demanda de eletricidade, além de poder servir como fonte de pesquisas, colaborando para aprofundar os conhecimentos na área.

Palavras-chave: Energias renováveis. Sistema fotovoltaico flutuante. Reservatório Castanhão.

Abstract

The use of floating photovoltaic systems has been gaining traction in several countries for being a new strategy which, aside from generating energy, avoids the loss of water as a resource through evaporation wherever they are installed. Furthermore, installation on water bodies also increases cooling on the modules, increasing their generation efficiency. The acquisition of land is not necessary for this type of system's installation, since the necessary infrastructure already exists at such reservoirs. In this way, this work verifies the technical feasibility of implanting such a floating photovoltaic system at the Castanhão Reservoir located in the state of Ceará, Brazil. For this assessment, initially the reservoir's dimensions were determined and the software program *PVsyst* Version 6.62 was then used to calculate energy generation, allowing for estimates of the reservoir's energy generation and production potential to be found, aside from amount of CO₂ emissions that were avoided. As main results, an installed potency of up to 5590MWp was achieved, corresponding to an annual energy production of 9256 MWh/year and 2129.3 tCO₂ emissions avoided. These results demonstrate the high potential of installing a floating photovoltaic system at this site, with the possibility for the system to supply part of the electricity consumption demand, aside from serving as a source of research, collaborating to deepening the knowledge in this area.

Keywords: Renewable energy. Floating photovoltaic systems. Castanhão Reservoir.

1 Introdução

Os problemas ambientais associados à utilização excessiva de combustível fóssil são notórios em todo o mundo. Como um recurso de energia limpa alternativa, o uso das fontes renováveis de energia está aumentando continuamente. Com isso, um grande número de sistemas de geração de energias renováveis está em foco, como a energia solar fotovoltaica. A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia com uma participação significativa também na matriz energética brasileira, e o

uso de sistemas fotovoltaicos flutuantes vem ganhando espaço em diversos países. Por se tratar de uma nova estratégia, apenas alguns estudos sobre o tema podem ser encontrados na literatura (LOPES; SOUZA-JÚNIOR, 2016).

Vários lugares que não têm terra suficiente para instalações fotovoltaicas (ilhas como o Japão, Cingapura, Coreia, Filipinas e muitos outros), optam por sistemas solares flutuantes, pois podem ser instalados em corpos d'água, como oceanos, lagos, lagoas, reservatórios, lagoas de irrigação, estações de tratamento de águas residuais, barragens, canais, etc. (UEDA et al, 2012).

A energia solar fotovoltaica flutuante é uma tecnologia que alcança um elevado grau de eficiência devido ao isolamento térmico consistente, devido às células solares nos corpos d'água que lhes dão suporte, o que reduz o ganho de calor no interior das células solares e provoca uma diminuição significativa da eficiência (HARTZELL et al., 2016).

Há um grande número de superfícies de água que poderiam ser utilizadas para instalações fotovoltaicas, como represas de hidrelétricas, reservatórios de balanço, lagos, lagoas. Esses tipos de sistema podem ser utilizados para substituir usinas, as quais são instaladas sobre áreas de florestas, áreas agrícolas e construções.

O semiárido nordestino brasileiro, onde está localizada a área de estudo, configura um cenário crítico no que se refere à questão hídrica, sendo a evaporação dos recursos hídricos um dos principais responsáveis por essa situação. Dessa forma, a instalação de painéis fotovoltaicos flutuantes em reservatórios hídricos são um meio de contribuir para diminuição da evaporação de superfícies d'água. Além disso, ajudam na redução do crescimento de algas e, por efeito do resfriamento dos módulos fotovoltaicos, há ainda a contribuição para aumento na eficiência de conversão dos mesmos.

Os sistemas fotovoltaicos flutuantes (Figura 1) são geralmente compostos por um conjunto de estantes montado no topo de plataformas flutuantes e, muitas vezes, são de natureza modular (TRAPANI ; SANTAFÉ, 2014).

Figura 1 – Painéis fotovoltaicos flutuantes na Barragem de Yamakura, Japão.



Fonte: Adaptado de Hartzell, 2016.

Os benefícios do uso dos sistemas fotovoltaicos flutuantes incluem a possibilidade de redução da evaporação da água em reservatórios e a diminuição no crescimento de algas devido à redução na quantidade de luz do sol dentro do corpo d'água (TRAPANI; SANTAFÉ, 2014). Além disso, os sistemas flutuantes podem ainda trazer o benefício de resfriar os módulos utilizados nessas instalações, levando a uma melhora no rendimento da eficiência de usinas fotovoltaicas. Estudos mostram que o sistema de placas fotovoltaicas flutuantes consegue ser cerca de 11% mais eficiente que projetos instalados em terra firme (CHOI, LEE; KIM, 2013).

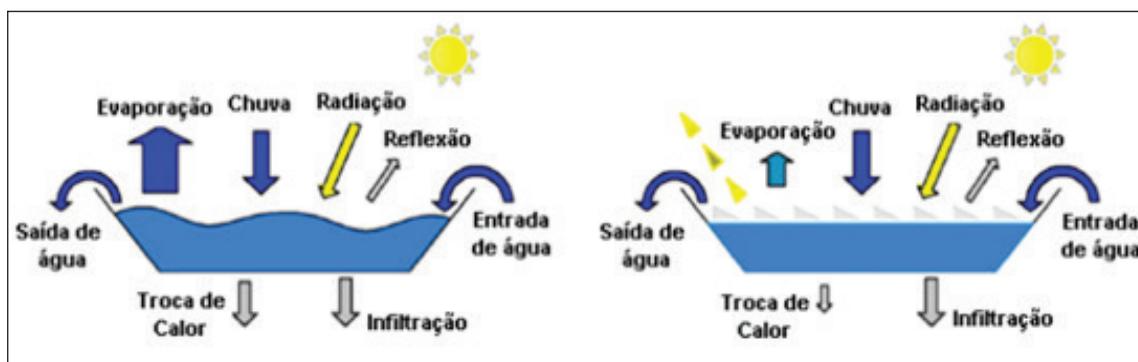
Os corpos de água onde os painéis solares flutuantes repousam são projetados para ter um resfriamento, pois a potência máxima das células solares diminui à medida que a temperatura da célula aumenta. Isto indica que o superaquecimento das células solares irá diminuir a potência dos painéis significativamente. Tal efeito na superfície posterior dos painéis

solares reduz a temperatura das células fotovoltaicas, permitindo-lhes gerar mais potência do que as instaladas em terra (MELVIN, 2015)

Ainda segundo Melvin (2015), a probabilidade de superaquecimento é reduzida, portanto, os painéis solares flutuantes têm uma potência de saída mais elevada, e exigência de manutenção mais reduzida do que painéis solares regulares instalados no chão ou em telhados de construção.

O principal objetivo dos painéis flutuantes é aprimorar a agitação das águas (Figura 2) nos reservatórios de irrigação (SANTAFÉ *et al.*, 2014). Existem reservatórios no Brasil onde a quantidade de água evaporada é igual ao valor da vazão do rio (FERREIRA, 2016).

Figura 2 – Agitação da água sem e com painéis flutuantes



Fonte: Adaptado de Santafé, 2014.

A utilização dos sistemas de produção de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos instalados em plataformas flutuantes acontece em alguns países desenvolvidos, motivadas principalmente para fins de irrigação. No Brasil, foram anunciados projetos pilotos para esse tipo de instalação, não existindo ainda estudos detalhados para um reservatório específico. Dessa forma, o presente trabalho busca analisar as necessidades e possibilidades do uso dessa tecnologia para o sistema integrado brasileiro, sendo também uma forma de diminuir as taxas de evaporação nos reservatórios do semiárido brasileiro. Assim, este trabalho objetiva realizar uma estimativa do potencial de produção de energia elétrica através de um sistema fotovoltaico flutuante no reservatório Castanhão - CE.

2 Metodologia

2.1 Área de estudo

O reservatório Castanhão localiza-se entre as coordenadas 5°29'55" (latitude Sul) e 38°26'52" (longitude Oeste), na Sub-bacia do Médio Jaguaribe, no Ceará, sob o domínio do clima semiárido (Figura 3). Este foi planejado no começo do século XX e é considerado o maior açude da América Latina (GAMA *et al.*, 2013).

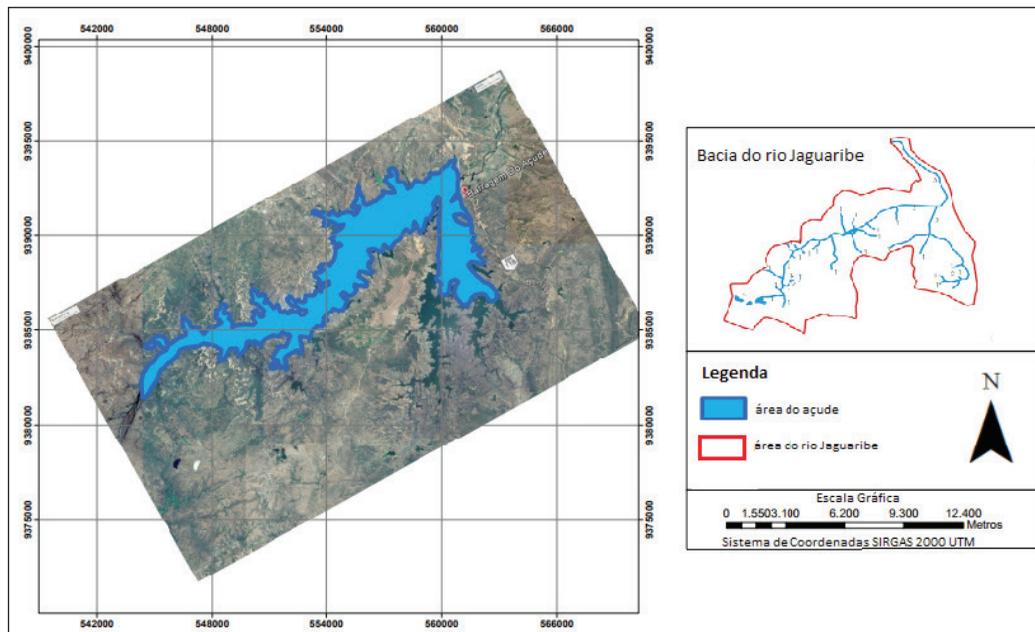
O reservatório Castanhão teve seu auge em 2004, quando atingiu 5,5 bilhões de m³, dos 6,7 bilhões do seu volume total (DNOCS, 2015). A capacidade hídrica do Castanhão é acondicionada por um reservatório do tipo terra homogênea/concreto, compactado a rolo. Ele tem uma profundidade de 50 metros, com altura de 60 metros, 7 metros de largura e uma extensão de 3,4 km (HIJO, 2009).

A barreira principal tem 1.500 metros de comprimento, 11 metros de largura, 12 comportas e 4 válvulas difusoras. A vazão é controlada diariamente para fins de tonar perene o Rio Jaguaribe, sendo, em média, preservada a 10 m³/s (ou seja, 10 mil litros) ao longo da fase de estiagem, e 5 m³/s na estação de chuvosa (GROSSI, 2009).

O principal objetivo da barragem é controlar as cheias do Baixo Vale do Jaguaribe, garantir água para o abastecimento da região metropolitana de Fortaleza e auxiliar a construção de um reservatório que controlasse a ligação com outras bacias. Além do uso para piscicultura e setor agrícola, o que estimula o desenvolvimento sustentável da região do Vale do Jaguaribe e do estado do Ceará, a geração de 22,5 megawatts de energia também é uma utilização do açude Castanhão (DNOCS, 2015).

De acordo com a Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará - SRH-CE, o açude tem 37% de toda a capacidade de armazenamento dos 8.000 reservatórios cearenses. O maior reservatório antes da construção do Castanhão era o Orós, que é uma barragem também do Rio Jaguaribe, mas que suporta pouco mais da metade do Castanhão.

Figura 3 – Localização da área para instalação do sistema fotovoltaico flutuante.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017.

As águas do açude são de fundamental importância para o abastecimento humano, irrigação, agricultura, pecuária, entre outras finalidades, sendo abastecido por meio da captação do açude. A piscicultura se tornou uma importante atividade econômica para a região do Vale do Jaguaribe, assim como a pesca e o turismo, especialmente devido à disponibilidade hídrica depois da construção do reservatório. Além das indústrias que se instalaram na região: indústria têxtil, produtos alimentícios, mineração, metalúrgica, química, entre outros (HIJO, 2009).

O Rio Jaguaribe tem também grande importância histórico-social, pois, antes da construção da barragem, era conhecido como “maior rio seco do mundo”, visto que era um rio sazonal, do tipo que apresenta água apenas em estações chuvosas, as quais desaparecem durante o período de estiagem, além de estar situado no semiárido (PEREIRA, 2014). O rio se tornou perene após a construção da barragem, pois o fluxo de água do rio passou a ser regular.

2 2 Dimensionamento do reservatório Castanhão

O ArcGIS foi o software usado para o dimensionamento do reservatório. É da empresa americana ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), especializada na manipulação e elaboração de informações vetoriais para gerenciamento de bases. O programa está dividido em três módulos operacionais: ArcToolbox, ArcCatalog e ArcMap. Com essas três ferramentas, é possível realizar das tarefas mais básicas até as mais complexas, como construção de cartografia, dados geográficos, análise espacial e conexão com importação de base de dados.

É disponibilizado pelo programa um Sistema de Informação Geográfica (SIG), com inúmeras ferramentas integradas e de fácil aplicação, simplificando os processos de trabalho. As coordenadas UTM são dadas em metros, e são necessárias para expressar a posição de pontos sobre uma superfície, seja uma esfera, plano, seja elipsoide, e é com base nessas coordenadas que descrevemos, geometricamente, a superfície terrestre.

2 3 Sistema fotovoltaico

O software *PVsys* foi utilizado para realizar a estimativa de produção de energia solar. O *PVsys* é um programa computacional de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. A versão usada neste trabalho foi a 6.62, de 01 de maio de

2017. O software foi criado em 1992 pelo físico suíço André Mermoud. Dentre as suas funcionalidades, estão: fornecer o projeto preliminar da instalação, a simulação de produção de eletricidade, os pré-dimensionamentos; possibilitar o desenvolvimento do projeto, os estudos de perdas por sombreamentos, a estimativa de produção e a estimativa de perdas, além da importação e exportação de dados de várias fontes distintas, dentre elas dados meteorológicos METEONORM e NASA-SSE satellite, relatório completo dos resultados e estimativa econômica e de remuneração. O programa também oferece relatórios minuciosos, com tabelas, dados do projeto e gráficos.

Inicialmente, na interface preliminar do software, é solicitado que se escolha uma entre as quatro ramificações principais: Preliminary design (Arranjo preliminar), *Project design* (Arranjo do projeto), *Databases* (Base de dados) e *Tools* (Ferramentas). Como este trabalho teve como objetivo o uso do *PVsystem* para elaborar o arranjo fotovoltaico e estimar a geração de energia no reservatório Castanhão, foi selecionado o botão *Project design* (Arranjo do projeto).

Para a continuação do projeto do sistema fotovoltaico foram seguidos os seguintes passos:

- **Localização geográfica:** Usando o banco de dados do “Google Maps”, localizou-se geograficamente a cidade (com longitude, latitude e altitude). Os dados foram adequados com o banco de dados da NASA, “*NASA-SSE satellite data, 1983-2005*” ou pelo “*Synthetic - Meteonorm 7.1*”, que é o banco de dados do *software PVsystem*. Com os dados estabelecidos, o software calcula a média mensal e anual da irradiação global, irradiação difusa, temperatura e velocidade dos ventos.
- **Albedo (irradiação refletida/irradiação incidente na superfície):** após de definir a localização geográfica, o software possibilita a escolha do albedo onde será instalado o sistema através da opção *Project Settings*. Neste trabalho, foi utilizado o valor correspondente ao tipo de superfície onde será instalado o projeto. A média de albedo para um corpo d’água, sem sombras, é de 0,124 no Rio Grande do Sul (LEIVAS, 2007); em Rondônia foi observado um albedo entre 0,08 e 0,10 (GUERRA; YOUSSEF, 2014). Deste modo, foi utilizado um valor mediano de 0,10, dentre os valores apresentados pelo *PVsystem*.
- **Inclinação do módulo fotovoltaico e Azimute geográfico (angulação formada a partir do Norte Magnético):** Nessa etapa de definição dos parâmetros, o primeiro passo a ser configurado é a orientação de instalação dos módulos. A maioria dos sistemas fotovoltaicos flutuantes utiliza sistemas fixos, então foram adotados sistemas fixos. O melhor resultado obtido foi utilizando o azimute de 0° em relação ao norte geográfico e uma inclinação de 10°. Esta configuração é bastante recomendada por inúmeras literaturas, possibilitando uma mesma captação de radiação com um número menor de módulos, o que reduz o custo de instalação.
- **Configuração do sistema:** os últimos critérios para simular a energia elétrica produzida são os dados dos sistemas:
 - i) Área da instalação. Como o sistema aceita até um valor máximo de 100.000 m² (0,1 km²). Definiu-se como área disponível 50% da área total, considerando-se que os outros 50% são áreas rasas, afastamentos regulamentares (tomadas de água, vertedouros, sistemas ancilares), irregularidades do contorno e áreas de aeração do reservatório.
 - ii) Escolha dos módulos fotovoltaicos. Nesta seção, é escolhido o painel fotovoltaico das empresas fabricantes dos diferentes módulos fotovoltaico (existe um amplo banco de dados no próprio software). Neste critério foi escolhido o painel mais compatível para o tipo de instalação estudada.
 - iii) Escolha do inversor de frequência (CC/CA). O banco de dados do software exibe os fabricantes e modelos de inversores, da mesma maneira que a seleção dos módulos fotovoltaicos, para a escolha dos inversores foram usados dados observados em projetos estudados e em projetos de instalações reais em solo.

3 Resultados e discussão

3.1 Escolha do arranjo fotovoltaico

3.1.1 Painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico utilizado neste trabalho foi escolhido a partir de painéis utilizados nos últimos anos para a implantação dos arranjos fotovoltaicos flutuantes, a partir da verificação destes painéis nos dados do software *PVsystem* e da comercialização dos mesmos no mercado brasileiro após a autenticação do INMETRO. Com base nessa análise, os

painéis da Yingli Solar demonstraram todas as características pré-estabelecidas, como apresentado na Tabela 1. Deste modo, o painel definido para este estudo foi o Yingli Solar de 310 Wp 31V Si-Poly (YL310P-35b).

Tabela 1 – Escolha do painel fotovoltaico.

Fabricante/Painel (WP)	PVsyst	Mercado Brasileiro/Autenticação do INMETRO
Kyocera (245 WP)	Sim	Sim (A)
Hanwha (250 WP)	Sim	Não
Trina (250 WP)	Sim	Não
Yingli (250 WP)	Sim	Sim
Kyocera (255 WP)	Não	Sim (A)
Yingli (255 WP)	Sim	Não
Mitsubishi (260 WP)	Sim	Não
Yingli (275 WP)	Não	Sim (A)

Fonte: Elaboração própria (2017).

3.1.2 Determinação do número total de painéis em função da área a ser ocupada

Após o dimensionamento do reservatório Castanhão, quando a área do reservatório foi analisada, pode-se perceber que grande parte do corpo hídrico estava com sedimentos aparentes ou se encontrava em um nível mais baixo do que o necessário para a implantação do sistema flutuante (Figura 4). O projeto não pode ser implantado em corpo hídrico raso, pois pode ocasionar em tombamento, danificando o arranjo do projeto fotovoltaico flutuante. Com isso é preciso que o projeto seja ancorado adequadamente, por esses motivos foi escolhido o meio do reservatório como local de ancoragem para o sistema flutuante.

Figura 4 – Reservatório Castanhão (a e b)



Fonte: Próprio autor, 2017.

Tendo em vista que o software aceita apenas até um valor máximo de 100.000 m² (0,1 km²), foi considerada a implantação dessa tecnologia em 0,07% da área total do reservatório (Tabela 2). Essa porcentagem em metros é avaliada em 35.000 metros, ou 0.035 km², de área a ser utilizada para o projeto fotovoltaico.

Tabela 2 – Área total considerada no reservatório.

Área total (m ²)	Área útil (m ²)	Área utilizada (m ²)
460.299,559	35.000	31.586

Fonte: Próprio autor, 2017.

Em relação ao sombreamento, o software *PVsyst* fornece os dados para a obtenção desses valores. De acordo com Stranguetto (2016), nos ângulos de maior inclinação do painel são obtidos as maiores perdas de sombreamento, mesmo com uma mesma latitude geográfica. A maior redução de perdas por sombreamento decorre quando o espaçamento entre

uma fileira e outra é modificado de 1 metro para 1,5 metros. Mesmo se aumentado para 2 metros não há variação de grande importância, em relação ao primeiro.

Então, foi adotado 1,5 m de espaçamento entre as fileiras de painéis, tendo em vista que os painéis estarão consideravelmente espaçados para a passarela de manutenção (o painel escolhido tem 0,99 m de largura e a passarela de 0,5 m).

A partir dessas considerações, utilizando o *PVsys* para uma área de aproximadamente 0,035 km² obteve-se um arranjo de 18.031 painéis, organizados em 949 fileiras de 19 painéis (Figura 5), para o qual são necessários 17 inversores. Uma vez que cada painel tem 1,96 m de comprimento, cada fileira de 19 painéis tem 37,24 m de comprimento. Portanto, cada fileira, incluindo o respectivo espaçamento de 1,5 m, tem uma área de 93 m², o que totaliza, para todo o arranjo, com 949 fileiras, uma área total de 15.149 m²:

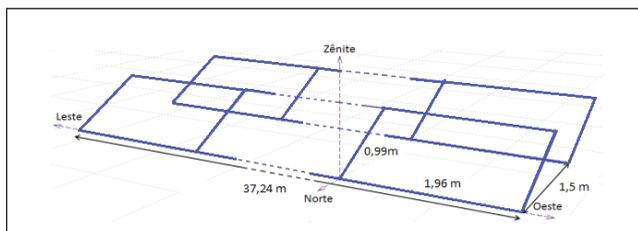
- **Área total do arranjo** = 37,24 m x 1,5 m x 949 = 53.011m²

É importante perceber que 31.586 m² dessa área representam apenas os painéis instalados. Dessa forma, pôde-se calcular a porcentagem ocupada por painéis do arranjo a ser instalado:

- **Porcentagem ocupada pelos painéis** = 31.586 m² / 53.011 m² = 0,59 ou 59%

O arranjo simulado tem potência de pico estimada em 5.589 kWp (310 WP x 18.031).

Figura 5 – Arranjo fotovoltaico



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de especificação do fabricante dos painéis.

3 1 3 Seleção do inversor de frequência

O inversor corrente contínua/corrente alternada pode ser considerado o coração do sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR). A escolha do inversor com uma boa qualidade é essencial para garantir um bom desempenho quando se trata de produtividade e segurança de um SFCR. Para a seleção do inversor adequado, a um gerador fotovoltaico, é necessário levar em consideração os níveis de corrente e tensão, flexibilidade de instalação, eficiência de conversão, durabilidade e segurança (ZILLES et al., 2012). Segundo Zilles et al.(2012), os inversores mais utilizados em SFCR são circuitos estáticos, ou seja, não contém partes móveis, e sua finalidade é realizar a conversão da potência c.c., proporcionada pelo gerador fotovoltaico, em potência c.a., que será introduzido na rede elétrica, sincronizado com a frequência e tensão de operação.

O inversor também tem como função dar continuidade do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico. Dessa forma, a máxima potência sempre estará disponível para que o gerador possa suprir sempre que necessário. Dentre os principais atributos técnicos do inversor, os parâmetros elétricos são fundamentais durante o processo de seleção e dimensionamento do inversor.

Para determinar o inversor, foram estudados os equipamentos desse tipo usados nos arranjos fotovoltaicos que estiveram na Chamada 13 da Aneel, e que foram analisados por Lopes (2013). Deste modo, o inversor escolhido para esse estudo foi o do fabricante Ingeteam, modelo Ingecon Sun 1000 TL M400 DC Indoor, de 1020 kW,

3.2 Estimativa de energia gerada e potência do sistema instalado

De acordo com a estimativa realizada através do software PVSyst, a energia anual produzida nesse sistema seria de 9256 MWh/ano, com fator de capacidade 19% e taxa de performance de 0,81. O resumo desses resultados é mostrado na Tabela 3

Tabela 3 – Resultados preliminares.

Medida	Unidade	Valor
Energia Atual	kWh	18.396
Fator de Capacidade	%	19
Taxa de Performance		0,81

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do PVSyst (2017).

Fator de capacidade é a proporção entre a produção efetiva da usina no período de tempo e a produção total no mesmo período.

$$\text{Como: } \frac{9252\text{MWh}}{(365\text{dias} * 24\text{h} * 5,5\text{MW})} = 0,19 \text{ ou } 19\%$$

É fundamental lembrar que esse modelo desempenha essa estimativa fundamentada nos dados de um sistema em terra, e não necessariamente seria o desempenho de um sistema flutuante. Isto ocorre devido ao resfriamento dos painéis em proximidade com a água, proporcionando uma temperatura menor e aumentando a produtividade (CHOI, LEE, & KIM, 2013). Um estudo realizado com um sistema de resfriamento em painéis fotovoltaicos em residências, notou-se que houve um aumento de 33,4 kWh/ano na produção do sistema. Outras medidas foram adotadas no sistema, como entrada de radiação, velocidade do vento, temperatura, perda de eficiência do inversor e radiação global, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados do Relatório detalhado do PVSyst.

Parâmetros do Sistema	Valor
Número de Módulos	18031 módulos
Número de Inversores	17 inversores
Potência	5590 MWp
Produção de Perdas por Mês	7225 MWh
Taxa de Performance	0,81
Potência por metro quadrado	6.2 MW/m ²
Irradiação Horizontal Global	2031.2 kWh/m ² (por ano)
Temperatura Ambiente	27.1 °C
Incidência Global	2035.5 kWh/m ² (por ano)
Irradiação Global (Corrigida pelas Sombras)	1974.5 kWh/m ² (por ano)
Energia de saída do Arranjo	9385.8 MW/h (por ano)
Energia injetada na Rede	9255.6 MW/h (por ano)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do PVSyst (2017).

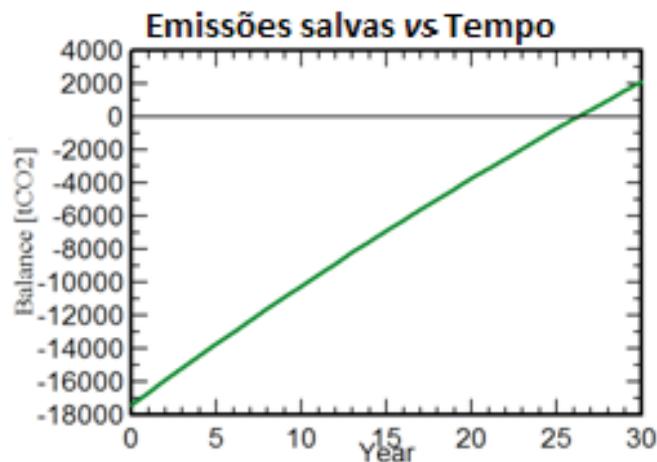
Outro fator importante que vale ressaltar são as emissões de carbono evitadas. O grande desafio encontra-se na redução satisfatória das emissões de CO₂ para a atmosfera, evitando a continuação do agravamento dos seus efeitos.

Segundo Alves (2008), a potência energética econômica mundial em 2014 caiu 2,3%, número maior do que o dobro da taxa média de queda observada na última década, como resultado de recorrentes melhorias na eficiência energética e mudança de estruturais econômicas como a China. As taxas de emissões de dióxido de carbono “CO₂” giram em torno de 11% e estão associadas com a produção de energia. Essas taxas aparecem em áreas onde é aplicada a prática do mercado de carbono (onde o preço médio é 6.23 € por cada tonelada de CO₂ emitido), os outros 13% apresentam-se em mercados onde se motiva o consumo aos combustíveis fósseis.

Os resultados obtidos mostram que a instalação de sistemas fotovoltaicos flutuantes no reservatório Castanhão tem um impacto não apenas socioeconômico, pois contribui na redução da poluição em créditos de carbono, como citado acima, mas também um importante aspecto do ponto de vista ambiental na economia de água (recursos hídricos).

A Figura 6 mostra as emissões de carbono evitadas no período de 30 anos, sendo evitada a emissão de 2129.3 tCO₂ a partir da implantação do projeto flutuante.

Figura 6 – Emissões de CO₂ evitadas.



Fonte: Elaboração própria a partir do PVsyst (2017).

4 Conclusão

O uso de sistemas fotovoltaicos flutuantes em superfícies de água, como é o caso de reservatórios de hidrelétricas e reservatórios para irrigação pode trazer o benefício de reduzir a evaporação de água nestes locais, além do benefício de produzir eletricidade. Esse tipo de instalação mostra-se muito eficaz para regiões do semiárido, que sofrem constantemente com a escassez hídrica, além de gerar energia elétrica através de uma fonte renovável para a população.

A estimativa do potencial de produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes no reservatório do Castanhão-CE mostrou um total de potência instalada de até 5590 MWp, correspondentes a uma produção anual de energia elétrica de 9256 MWh/ano. O arranjo idealizado e simulado neste trabalho para o reservatório Castanhão contém 18031 módulos, 17 inversores, fator de capacidade médio de 19% e taxa de performance de 0,81. Além disso, foi obtido que o sistema dimensionado evitaria a emissão de 2129.3 tCO₂.

Neste estudo, não se buscou realizar uma análise custo-benefício, somente um enfoque na potencialidade de um projeto de sistema FVF devido ao fato de ser uma aplicação teórica e experimentalmente nova no cenário mundial. Uma análise custo-benefício seria mais eficiente após a instalação de um protótipo e coleta de dados práticos com a aplicação real do projeto.

Referências

- ALVES, V. A. M. Dimensionamento de sistemas de produção de electricidade baseados em energia solar fotovoltaica. 2008. 95 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- ANDRADE, S. C. P. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo do balanço de energia em áreas de floresta e pastagem em Rondônia no Brasil**. 2014. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- CHOI, Y.-K.; LEE, N.-H.; KIM, K.-J. Empirical research on the efficiency of Floating PV systems compared with Overland PV Systems. In: CES-CUBE, Guam, 2013. **Proceedings...** Guam, 2013. v. 25, p. 284-289.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS. **Castanhão**. Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br/barragens/castanhao/castanhao.html>>. Acesso em: 08 maio 2017.
- FERREIRA, R. S. A. Apontamentos de defesa de Tese. 2016. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-SP. Trabalho não publicado.
- GAMA, A. F.; OLIVEIRA, A. H. B. DE.; CAVALCANTE, R. M. Inventário de agrotóxicos e risco de contaminação química dos recursos hídricos no semiárido cearense. **Química Nova**, São Paulo, v. 36, p. 462-467, 2013.
- GUERRA, J. B. S. O. A.; YOUSSEF, Y. A. **As energias renováveis no Brasil**: entre o mercado e a universidade. Palhoça: Unisul, 2011.
- HARTZELL, T. S. **Evaluating potential for floating solar installations on Arizona Water Management Infrastructure**. 2016. 50 f. TCC (Graduação) - College Of Architecture, University Of Arizona, Arizona, 2016.
- HIJO, C. A. G. **Quantificação do efeito do açude Castanhão sobre o fluxo fluvial de material particulado em suspensão e nutrientes para o estuário do rio Jaguaribe, Ceará-Brasil**. 2009. 34 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- LEIVAS, J. et al. Variação Diária do Albedo Sobre uma Superfície Vegetada e Sobre um Lago na Estação Experimental da UFRGS-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju – SE. **Anais...** Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/leaa/arquivos/Artigos%20em%20Eventos%20Cient%3%ADficos/Leivas%20Fontana%20Berlato%20Cardoso%20CBA%202007.pdf>>. Acesso em: 09 maio 2017.
- LOPES, D.G. **Análise de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no âmbito do mecanismo de desenvolvimento limpo**: estudo de caso dos projetos da chamada N°13 da ANEEL. 2013. 216 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- LOPES, M. M., SOUZA-JUNIOR, P. A. Sistemas fotovoltaicos flutuantes: análise do tema e estudo de caso para o lago da UNIFEI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 10. 2016, Gramado-RS. **Anais...** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311451799_SYSTEMAS_FOTOVOLTAICOS_FLUTUANTES_analise_do_tema_e_estudo_de_caso_para_o_lago_da_UNIFEI>. Acesso em: 09 maio 2017.
- MELVIN, G. K. X. Experimental study of the effect of floating solar panels on reducing evaporation in Singapore Reservoirs. 2015. 36 f. TCC (Graduação) - Curso de Engineering Department of Civil & Environmental Engineering, University of Singapore, Singapore, 2015.
- PEREIRA, F. A. C. Uma **Análise computacional e geo espacial do sistema hídrico do complexo portuário do Pecém**. 2014. 76 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos) - Curso de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- PVSYST – Photovoltaic software. **Founders**. Disponível em: <<http://www.PVsyst.com/en/about-us/founder>>. Acesso em: 05 jun. 2017.
- SANTAFÉ, M. R. et al. Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs. **Energy**. v. 67, p. 246-255, 2014.
- STRANGUETO, K. M. **Estimativa do potencial brasileiro de produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de hidroelétricas**. 2016. 144 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.
- SUDHAKAR, K. Floating photovoltaic power plant: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**,

Amsterdã, v. 66, p. 815-824, 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/307540858>>. Acesso em: 05 jul. 2017.

SUDHAKAR, K. Floating photovoltaic power plant: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 66, p. 815-824, 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/307540858>>. Acesso em: 05 jul. 2017.

TRAPANI, K.; SANTAFÉ, M. R. A review of floating photovoltaic installations: 2007– 2013. **Prog. Photovolt. Res. Appl.**, Medfordv. 23, n. 4, p. 524–532, 2014.

UEDA, Y. et al. Five years demonstration results of floating PV systems with water spray cooling. EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 27,, 2012, Frankfurt. **Anais...** Disponível em: <<https://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings/dvd.html>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

ZILLES, R. **Avanços e desafios para a energia solar Fotovoltaica no Brasil**. Campinas: IEI, 2012. Disponível em: <<http://www.iei-la.org/inovafv/admin/resources/uploads/robertozilles.pdf>>. Acesso: 06 nov. 2017.

Sobre os autores

Brigida Miola Rocha

Doutora em Ciências Marinhas pela Universidade Federal do Ceará e Senckenberg Forschungsinstitut - Alemanha. Mestre em Ciências Marinhas (LABOMAR - UFC) e Bacharel em Química com habilitação em Química Industrial (UFC). Vinculada ao Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO-UECE). Professora integral do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade de Fortaleza e coordenadora pedagógica do curso Tecnólogo em Energias Renováveis.

Francisca Dayane Carneiro Melo

Doutoranda em Energias Renováveis - Engenharia Elétrica Universidade Federal do Ceará - UFC. Mestre em Energias Renováveis pela Universidade Estadual do Ceará - UECE (Ciências Físicas Aplicadas - 2011). Graduada em Matemática também pela UECE (2007). Formação técnica em Segurança do Trabalho (2005) e em Telecomunicações (2004) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Exerceu função de gerente do Instituto Senai de Tecnologia em Energias Renováveis, professora universitária do curso de Energias Renováveis na Universidade de Fortaleza - Unifor.

Yorrana Coutinho Porto

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade de Fortaleza

Francisco de Assis Leandro Filho

Graduado em Física pela Universidade Estadual do Ceará (2010) e mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Ceará (2012). Atualmente, é aluno do Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Ceará em nível de Doutorado e professor de ensino básico, técnico e tecnológico (EBTT) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Camocim. Tem experiência em Física (com ênfase em Física Computacional), em Ensino de Física (com ênfase em Alternativas Metodológicas Para O Ensino de Física) e em Energias Alternativas (com ênfase em Energia Eólica).

Rodrigo Alves Patricio

Professor de Física da Universidade de Fortaleza - Unifor, ligado à área de Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas. Concluiu a graduação em Física- Licenciatura, em 2010, o mestrado em Ciências Físicas Aplicadas, em 2013, ambos pela UECE (Universidade Estadual do Ceará). Tem experiência na área de Energias Renováveis, com ênfase na Economia do Hidrogênio. Energia Solar e Energia Eólica.