



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL
DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
ENGENHARIA DE ENERGIAS**

LANA CARLA DE SOUSA CRUZ

**ESTUDO DE CASO: GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA ATRAVÉS DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICO FLUTUANTE NA CIDADE DE MARANGUAPE-CE**

REDENÇÃO-CE

2023

LANA CARLA DE SOUSA CRUZ

ESTUDO DE CASO: GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA ATRAVÉS DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICO FLUTUANTE NA CIDADE DE MARANGUAPE-CE

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
em Engenharia de Energias do Centro
Tecnológico da Universidade da Integração
Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira,
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientadora: Prof^ª. M^a. Janaína Barbosa Almada.

REDENÇÃO-CE

2023

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB

Catálogo de Publicação na Fonte.

Cruz, Lana Carla de Sousa.

Cvvve

Estudo de caso: geração de energia limpa através de módulos
fotovoltaico flutuante na cidade de Maranguape-CE / Lana Carla deSousa
Cruz. - Redenção, 2023.

47f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de
Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração
Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2023.

Orientador: Profa. Dra. Janaína Barbosa Almada.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Energia solar. 3.
Energia - Fontes alternativas. I. Título

CE/UF/BSP

CDD 333.79

LANA CARLA DE SOUSA CRUZ

ESTUDO DE CASO: GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA ATRAVÉS DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICO FLUTUANTE NA CIDADE DE MARANGUAPE-CE

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
em Engenharia de Energias do Centro
Tecnológico da Universidade da Integração
Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
como requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovada em: 27/06/2023.

BANCA EXAMINADORA

Janaína Barbosa Almada

Prof^ª. M^a. Janaína Barbosa Almada (Orientadora)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Juliana Alencar Firmo de Araújo

Prof^ª. Dr^a. Juliana Alencar Firmo de Araújo
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Sílvia Helena Dantas de Lima

Prof^ª. Dr^a. Sílvia Helena Dantas de Lima
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

A Deus.

A minha mãe.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida e por me conceder muita determinação durante todos esses anos de estudo.

À minha mãe, pelo apoio incondicional e incentivo durante toda minha caminhada acadêmica. Você foi a minha fonte de força e motivação durante todo o processo.

Ao Prof^a. M^a. Janaína Barbosa Almada, pela excelente orientação, apoio e paciência. Seu conhecimento e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento desta monografia.

Aos professores participantes da banca examinadora e aos demais, verdadeiros guias nesse caminho de conhecimento. Vocês são os verdadeiros mentores e inspiradores.

Aos meus amigos Cláudia Guimarães, Pedro Borges, Claudino Mendes e Guilherme Prata que permaneceram ao meu lado durante todo o percurso, pela companhia, pelos momentos de estudo em conjunto e pelas trocas de ideias que foram enriquecedoras. Com vocês essa jornada ficou mais leve e prazerosa.

Por fim a UNILAB, por oferecer as condições necessárias para que eu pudesse me desenvolver plenamente.

RESUMO

A dependência excessiva de fontes de energias não renováveis apresenta risco para a segurança energética, a estabilidade econômica e ao meio ambiente. A busca pela diversificação da matriz energética aumenta a participação das energias renováveis como a solar, eólica, hidrelétrica, biomassa e geotérmica que oferecem uma alternativa sustentável. O Brasil possui altas incidências solar e a instalação de grandes usinas solar fotovoltaica convencional tem se expandido. A tecnologia flutuante ainda não é comum apresenta oportunidades promissoras, pois o país tem potencial para o desenvolvimento desta tecnologia devido à grande quantidade de corpos hídricos disponíveis. O presente estudo do trabalho apresenta a possibilidade de uma instalação de usina solar fotovoltaica no reservatório do rio Maranguapinho na cidade de Maranguape-CE para geração de energia. A escolha da área de estudo, contribui para a redução da evaporação da água dos reservatórios, já que a região Nordeste sofre com escassez hídrica. O desenvolvimento para a implantação desse sistema consistiu em usar os *softwares* Google Earth Pro para a localização do reservatório, o ArcGis para georreferenciar as imagens e o Radasol 2 para os dados da irradiação solar; os portais da FUNCEME para os dados do nível de água do reservatório e da CRESESB informar a velocidade do vento. Durante o dimensionamento foram considerados 200 flutuadores e 600 módulos fotovoltaicos equivalente a uma área de 1.152m^2 , gerando uma energia referente a uma média de 30,33MWh mensalmente.

Palavras-chave: usina solar fotovoltaica flutuante; flutuador; ancoragem

ABSTRACT

Excessive reliance on non-renewable energy sources poses a risk to energy security, economic stability and the environment. The search for diversification of the energy matrix increases the share of renewable energies such as solar, wind, hydroelectric, biomass and geothermal that offer a sustainable alternative. Brazil has high solar incidence and the installation of large conventional photovoltaic solar plants has expanded. Floating technology is still not common and presents promising opportunities, as the country has potential for the development of this technology due to the large amount of water bodies available. The present work study presents the possibility of installing a photovoltaic solar plant in the Maranguapinho river reservoir in the city of Maranguape-CE for power generation. The choice of the study area contributes to the reduction of water evaporation from the reservoirs, since the Northeast region suffers from water scarcity. The development for the implementation of this system consisted of using Google Earth Pro software to locate the reservoir, ArcGis to georeference the images and Radasol 2 for solar irradiation data; the FUNCEME portals for data on the water level of the reservoir and CRESEB inform the wind speed. During the sizing, 200 floats and 600 photovoltaic modules equivalent to an area of 1,152m² were considered, generating energy referring to an average of 30.33MWh monthly.

Keywords: floating photovoltaic solar plant; float; anchoring

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Componentes da radiação global incidente numa superfície.	16
Figura 2: Mapa total diário da irradiação global horizontal do Brasil	17
Figura 3: Expansão da matriz elétrica brasileira (Dezembro/2022)	18
Figura 4: Representação do processo de conversão fotovoltaica	20
Figura 5: Esboço de plantas flutuantes fotovoltaicas	21
Figura 6: Esquema de flutuadores puros	22
Figura 7: Esquema de balsas modulares	22
Figura 8: Esquema de flutuadores membrana	22
Figura 9: Tipos de ancoragem (a) fundo (b) na costa e (c) por estacas	23
Figura 10: Símbolos utilizados para representar um inversor CC/CA	24
Figura 11: Célula fotovoltaica de silício monocristalino	26
Figura 12: Célula fotovoltaica de silício policristalino	27
Figura 13: Célula fotovoltaica de silício amorfo	27
Figura 14: Fluxograma das etapas do estudo	29
Figura 15: Área delimitada da usina fotovoltaica flutuante	31
Figura 16: Reservatório da barragem do rio Maranguapinho via satélite	32
Figura 17: Gráfico da variação do nível da água do reservatório	33
Figura 18: Gráfico da velocidade do vento no reservatório	33
Figura 19: Dados inseridos no Radasol 2	34
Figura 20: Gráfico da radiação solar média global	34
Figura 21: Sistema de flutuação BC-003F	36
Figura 22: Sistema de ancoragem do projeto	36
Figura 23: Curvas do módulo fotovoltaico RSM40-8-405M (a) Características em diferentes irradiações (b) Características em diferentes temperaturas	38
Gráfico 1: Geração de energia	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados extraídos do Radiasol 2	35
Tabela 2: Parâmetros do módulo TITAN RSM40-8-405M	37
Tabela 3: Datasheet do inversor Ginlong Solis 5S-GC100K(trifásico)	39
Tabela 4: Arranjo do sistema fotovoltaico	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S.Brito
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
HDPE	<i>High Densinty Polyethylene</i> (Polietileno de Alta Densidade)
IP67	<i>Ingress Protection</i> (Classe de Proteção)
MPPT	<i>Maximum Power Point Traing</i> (Ponto Máximo de Potência)
PP	Polipropileno
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (Condições de Teste)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos.....	14
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	14
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	14
1.2 Justificativa.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 O Sol: fonte de energia elétrica	16
2.2 Potencial energético solar no Brasil	17
2.3 História da energia solar fotovoltaica	19
2.4 Sistema fotovoltaico flutuante	20
2.4.1 <i>Sistema flutuante</i>	21
2.4.2 <i>Sistema de fixação e ancoragem</i>	22
2.4.3 <i>Cabos e equipamentos elétricos</i>	24
2.4.4 <i>Tipos de módulos fotovoltaicos</i>	26
2.4.5 <i>Desafios e oportunidades das usinas flutuantes</i>	27
3. METODOLOGIA.....	29
4. ESTUDO DE CASO	31
4.1 Localização da área de estudo	31
4.2 Profundidade do reservatório, solo, variação do nível da água e velocidade do vento	32
4.3 Potencial de Irradiação solar, temperatura ambiente e nível de umidade no local.....	34
4.4 Determinação dos componentes do sistema	35
4.4.1 <i>Flutuador e ancoragem</i>	35
4.4.2 <i>Módulo Fotovoltaico</i>	37
4.4.3 <i>Inversor</i>	38
4.4.4 <i>Configuração do sistema fotovoltaico</i>	39
4.5 Energia gerada	41
5. CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

As energias renováveis desempenham um papel fundamental na busca pelo desenvolvimento sustentável. A sociedade atual tem enfrentado desafios para conciliar a demanda energética crescente com a preservação do meio ambiente e com o crescimento econômico. Elas são consideradas uma alternativa viável, limpa e sustentável, pois são baseadas em recursos naturais abundantes e inesgotáveis. No Brasil, a hidroeletricidade uma energia renovável, tem sido a fonte geradora principal de energia elétrica há muitas décadas (MARIANO; JUNIOR, 2022).

A hidrelétrica é uma fonte de energia renovável, porém é necessário encontrar um equilíbrio, pois sua construção pode causar danos ambientais como: perda de *habitats* naturais, deslocamento das comunidades locais, desmatamento, e pode levar à emissão de gases de efeito estufa devido a decomposição de matéria orgânica no fundo do reservatório, contribuindo para as mudanças climáticas. Essas mudanças também podem afetar a disponibilidade de água e a geração da energia das hidrelétricas (CARVALHO, 2020).

O desafio da transição da matriz energética é um desafio complexo, pois busca soluções para uma geração de energia com menos impacto ambiental (CARVALHO, 2020). Diante disso, a tecnologia solar fotovoltaica flutuante tem sido uma opção viável, não só por proporciona ganhos de eficiência na geração de energia, mas também por superar as restrições de espaço que a instalação solar fotovoltaica convencional enfrenta. Além disso visa minimizar os impactos ambientais e a evaporação de água dos próprios reservatórios das hidrelétricas ao cobrir a superfície da água com os módulos fotovoltaicos. Embora essa tecnologia ainda esteja em desenvolvimento e não seja comum no território brasileiro, seu potencial é promissor. Os estudos e projetos-piloto estão sendo realizados para avaliar sua viabilidade técnica, econômica e ambiental, o que permitirá uma melhor compreensão de seus benefícios e desafios (EPE, 2020).

A implementação de um sistema solar fotovoltaico flutuante na cidade de Maranguape-Ce, visa aumentar a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira para a diversificação da matriz, a redução da dependência de fontes não renováveis, a redução da escassez hídrica, problemática que o Brasil enfrenta há décadas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a implementação de um sistema para gerar energia por meio de módulos fotovoltaicos flutuante no reservatório de água da cidade de Maranguape-Ce.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar o mapeamento da área a ser estudada
- Analisar os insumos necessários para instalação de uma usina solar flutuante
- Avaliar o potencial técnico do empreendimento

1.2 Justificativa

A escassez hídrica é uma problemática que o Brasil enfrenta há décadas. No ano de 2021, a escassez de chuvas provocou a redução do nível de água dos reservatórios e consequentemente resultou na redução da geração de energia hidrelétrica. Isso levou ao acionamento das usinas termelétricas para suprir a demanda energética e compensar a redução na oferta de hidroeletricidade (EPE, 2022).

O estudo de energia solar fotovoltaica flutuante é uma tecnologia inovadora no contexto mundial. Essa tecnologia é a combinação de energia renovável com utilização de superfícies de água, como reservatórios de hidrelétricas, lagos e oceanos. Essa implementação ajuda na diversificação da matriz energética, tornando uma energia complementar, apresentando importância maior durante os períodos de escassez hídrica (ESMAP *et al.*, 2019) (SOLAR PLAZA, 2019).

Além da geração de energia elétrica, os sistemas fotovoltaicos flutuantes apresentam benefícios adicionais, como a redução da evaporação dos reservatórios de água. Essa característica reforça o abastecimento hídrico nas regiões que enfrentam escassez, como o semiárido brasileiro (ZAPAROLLI, 2023).

No ano de 2019, 885 mil litros de água por segundo numa superfície média de 39,95 mil quilômetros quadrados de espelho d'água, totalizando 27,9 trilhões de litros por ano. A taxa de evaporação média no país entre 2001 e 2019 variaram entre 20 e 29 litros por segundo por km² de superfície. As maiores vazões de evaporação no Brasil foram superiores a 1.000m³/s no ano de 2007 (1.072 m³/s), 2012 (1.070 m³/s), 2005 (1.056 m³/s) e 2002 (1.028 m³/s). Segundo os estudos os valores de evaporação são menores entre os meses de janeiro e junho em determinadas regiões. E entre os meses de agosto e novembro as taxas de evaporação tendem

aumentar alcançando a média de 2.000 litros por segundo (ANA, 2021).

A preocupação com o meio ambiente tem impulsionado a importância do desenvolvimento de energias renováveis, e a energia solar fotovoltaica tem ganhado destaque nesse cenário. O mercado tem mostrado ser promissor devido aos avanços tecnológicos. A transição para fontes renováveis como a solar, é fundamental para diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Sol: fonte de energia elétrica

O sol é considerado a fonte energética principal para a Terra, pois é a fonte mais abundante, limpa e inesgotável na escala terrestre de tempo, possuindo um grande potencial para a produção de energia térmica e elétrica através de sistemas de captação e conversão de energia (CEPEL – CRESESB, 2014; MARIANO, URBANETEZ, 2022).

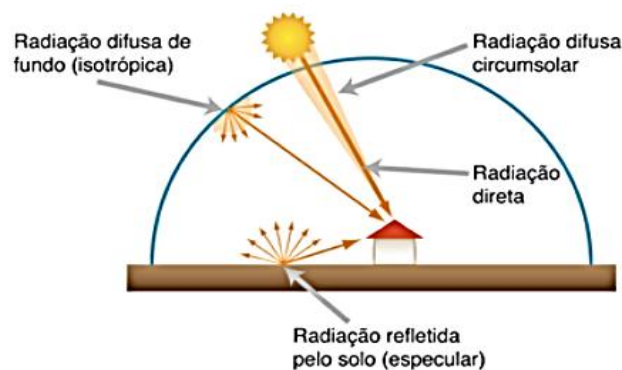
Os raios se propagam chegando à Terra com uma intensidade em torno de $1,367 \text{ W/m}^2$ acima da atmosfera correspondendo a uma potência total disponibilizada de aproximadamente 174 mil TW (CEPEL – CRESESB, 2014).

Segundo Yahyaoui (2018) “a radiação solar incidente real, a insolação é a energia solar incidente por unidade área em determinado local e varia de acordo com:

1. A posição na terra, devido à inclinação dos eixos de rotação da Terra;
2. A hora do dia devido à rotação da Terra;
3. O mês do ano devido à rotação;
4. O ângulo de incidência;
5. A presença de nuvens na massa de ar e os efeitos ambientais.”

A radiação solar pode ser obtida de forma direta, indireta (difusa) e refletida, conforme a Figura 1. A forma direta ocorre quando os raios solares chegam até a superfície terrestre sem sofrer influência; já na forma difusa os raios solares chegam em pequena quantidade após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre (CEPEL – CRESESB, 2014). A radiação refletida é uma reflexão que ocorre pelo ambiente em torno dependendo das características ópticas da superfície (MAGARREIRO; FREITAS; BRITO, 2016).

Figura 1. Componentes da radiação global incidente numa superfície.



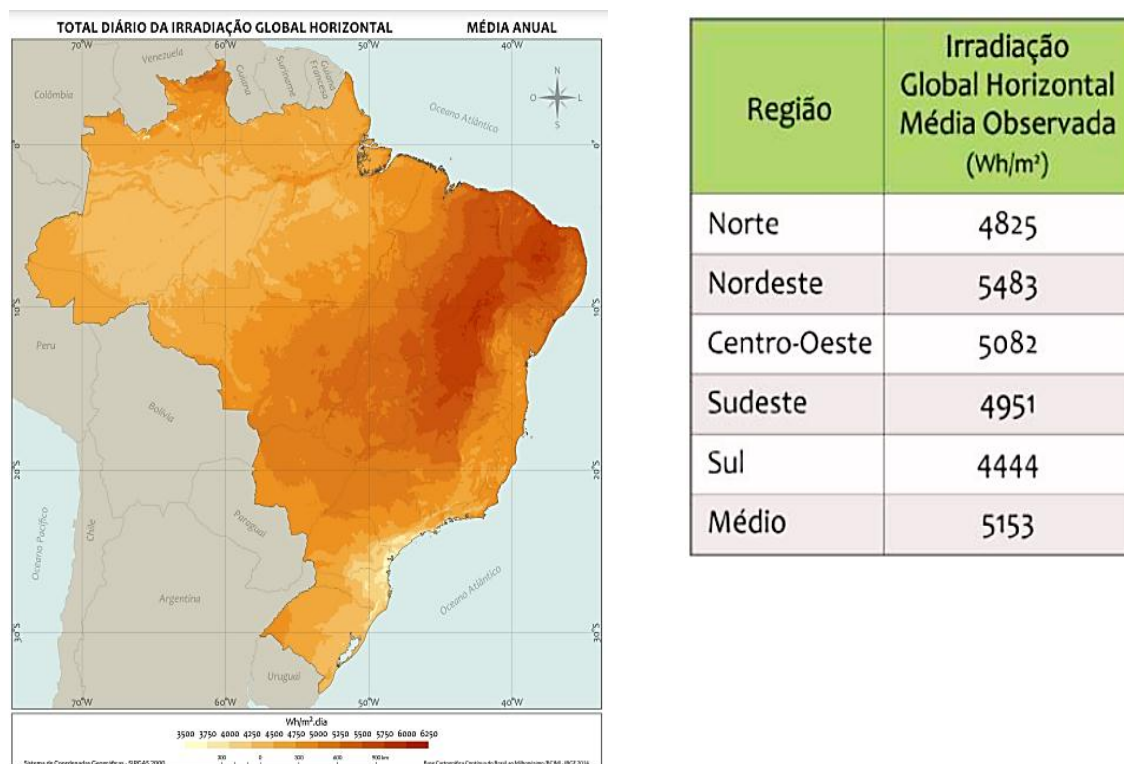
Fonte: Magarreiro; Freitas; Brito (2016).

2.2 Potencial energético solar no Brasil

O Brasil possui um território continental que abrange áreas de baixas e altas latitudes, o que significa que a incidência solar varia de acordo com a região. A região Nordeste apresenta um grande potencial para a geração de energia solar, devido a quantidade de horas de sol e altos índices de irradiação solar durante o ano (PEREIRA *et al.*, 2017).

De acordo com os dados do Atlas Brasileiro Solar (2017), a média de irradiação solar no Brasil tem uma variância entre 4.500 Wh/m².dia a 6.300 Wh/m².dia. Essas altas incidências é um fator favorável pra a geração de energia solar. A Figura 2 mostra o mapa total da irradiação global horizontal do Brasil destacando as áreas com maior incidência solar a região Nordeste e o Centro-Oeste mais conhecidos como região do Cinturão Solar. O aproveitamento desse potencial impulsiona a geração de energia limpa e renovável, o que contribui para a diversificação da matriz energética do país (PEREIRA *et al.*, 2017).

Figura 2: Mapa total diário da irradiação global horizontal do Brasil.



Fonte: Pereira *et al.*, (2017).

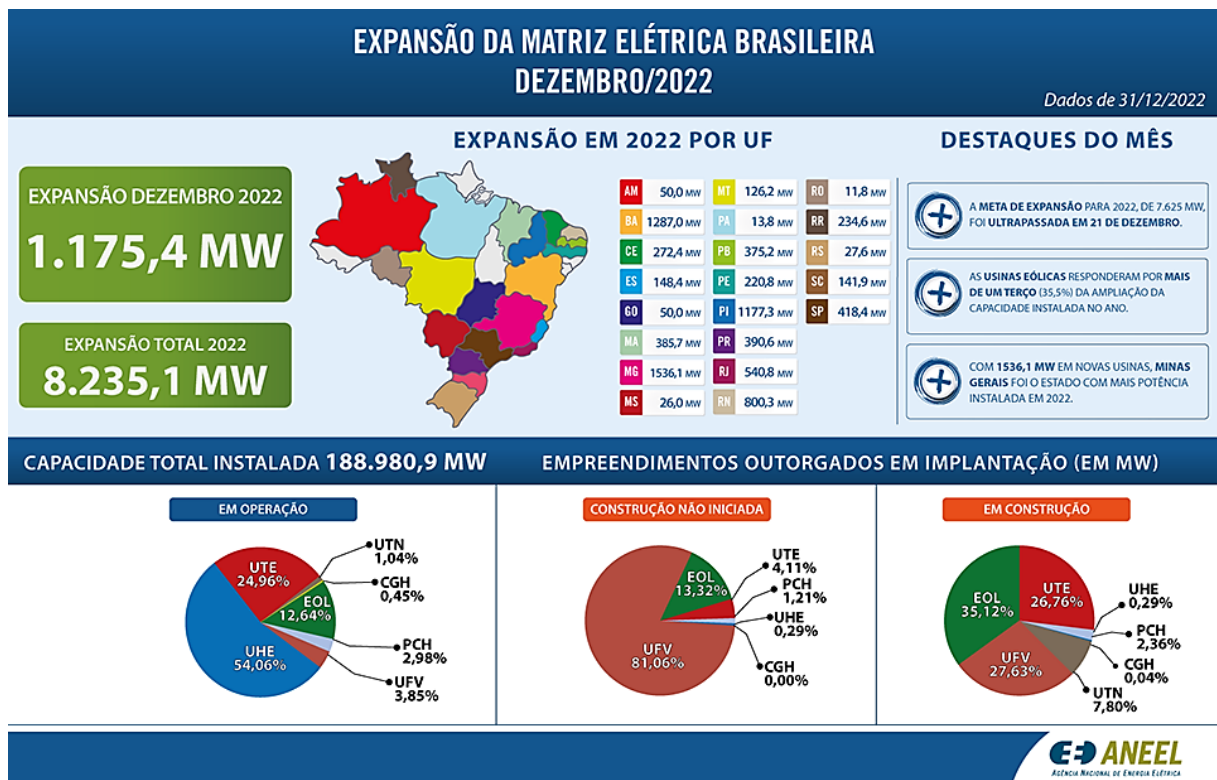
A região do Ceará, na região nordestina recebe altos níveis de irradiação solar ao longo do ano. Além disso, o clima semiárido predominante no estado, favorece ainda mais a produção de energia solar, uma vez que apresenta pouca incidência de nuvens e chuvas. Essas condições favoráveis, contribuem para o potencial promissor do estado no setor energético

(OLIVEIRA; GUERRA, 2021).

A disponibilidade hídrica na região Nordeste é limitada em grandes regiões do estado devido a predominância do clima seco, que consequentemente afeta a produtividade hidrelétrica. No entanto, a presença do Rio São Francisco é uma exceção, pois atravessa a região e alimenta usinas hidrelétricas de Sobradinho e Paulo Afonso localizadas na Bahia, e a de Xingó em Sergipe e Alagoas. Essas usinas desempenham um papel significativo na geração de eletricidade pois aproveitam o fluxo da água do rio que possui uma vazão relativamente constante. Devido a essa limitação de produção hidrelétrica no restante do território, a busca por fontes renováveis complementares como a eólica e a solar estão ganhando destaque e contribuindo para a diversificação da matriz energética (IPECE, 2018).

De acordo com os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2022 a região Nordeste registrou uma expansão de 4.518,7 MW na capacidade instalada para a produção de energia elétrica, representando 55% do acréscimo total no país. Desse total, 1.287,0 MW são provenientes da Bahia, 1.177,3 MW do Piauí, 800,3MW do Rio Grande do Norte, 385,7MW do Maranhão, 375,2MW da Paraíba. O Ceará ocupando a 6ª posição com 272,4 MW com 71,40 MW provenientes das usinas eólicas e 201,0 MW de usinas solares (ANEEL, 2023) como mostra a Figura 3.

Figura 3: Expansão da matriz elétrica brasileira (Dezembro/2022).



Fonte: EPE (2023).

2.3 História da energia solar fotovoltaica

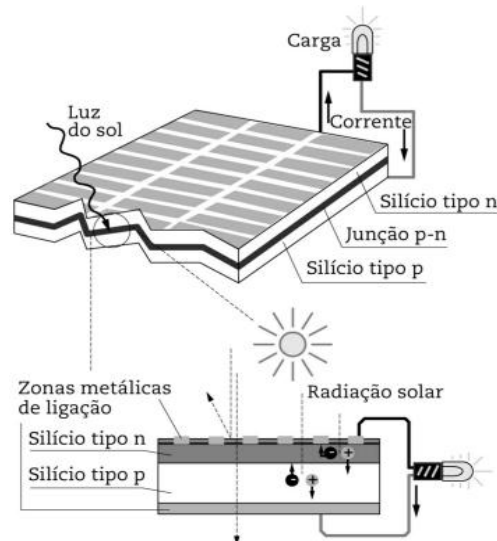
A utilização da energia solar tem acontecido desde a Antiguidade tanto na forma passiva quanto na ativa. De forma natural passiva, é utilizada para produzir alimentos, bem como na agricultura e pecuária, e na arquitetura para a iluminar e aquecer ambientes internos (REBOLLAR; RODRIGUES, 2014). Na forma ativa, existem tecnologias que permitem o aproveitamento da radiação na forma de calor e eletricidade, podendo ser aplicados em diferentes áreas, como em sistemas de aquecimento solar para aquecer água ou ambientes, sistema fotovoltaico e os concentradores solares térmico para gerar eletricidade (BLUESOL, 2021).

A história da energia solar fotovoltaica começa quando o efeito fotovoltaico foi observado pelo cientista francês Becquerel pela primeira vez no ano de 1839. Durante um experimento com célula eletrolítica mergulhada em uma solução condutora, percebeu a conversão da irradiação solar em eletricidade (FADIGAS, 2012).

A primeira célula solar moderna foi criada em 1954 e apresentada no encontro *National Academy of Sciences* por Russell Shoemaker, que foi o primeiro a patentear o sistema fotovoltaico moderno. Contudo, somente em 1958 deu início o uso dos módulos fotovoltaicos de silício (MÓDULO ENERGIA, 2022). A criação desses módulos teve participação do químico Call Fuller, que em 1954 desenvolveu o processo de dopagem do silício. A sua descoberta foi compartilhada com os cientistas Gerald Pearson e Daryl Chapin que propuseram melhorias na técnica através de experimentos realizados no Bell Laboratories (PORTAL SOLAR, 2020).

O material semicondutor mais usado para a fabricação da célula é o silício. A dopagem do silício com outros elementos químicos cria as camadas com propriedades elétricas diferentes, como “p” e “n”. A junção dessas camadas “pn” quando exposta ao sol, gera uma diferença de potencial, mais conhecido como efeito fotovoltaico. Esse potencial é usado para gerar uma corrente elétrica, quando os lados positivos e negativos da célula são interligados por meio de um condutor externo, como mostra a Figura 4 (CEPEL-CRESESB, 2014).

Figura 4: Representação do processo de conversão fotovoltaica



Fonte: Zilles *et al.* (2012).

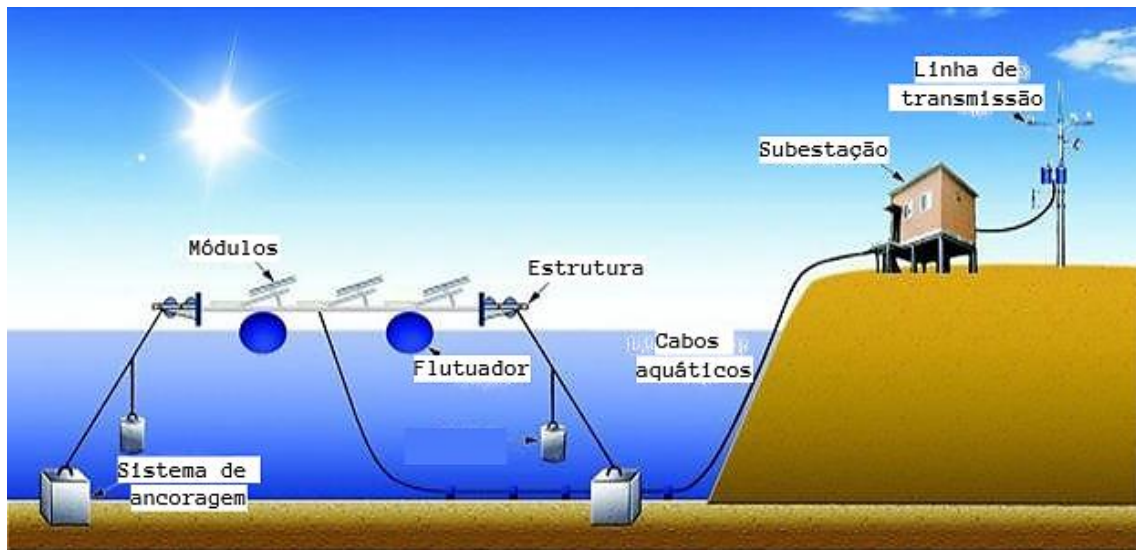
2.4 Sistema fotovoltaico flutuante

O sistema fotovoltaico flutuante é um sistema que pode ser instalado em espelhos d'água naturais ou artificiais, sendo uma alternativa de aplicação com ganhos de eficiência. Esse tipo de sistema é a junção de uma tecnologia existente com uma ideia nova que consiste de uma plataforma flutuante composta basicamente por: módulos fotovoltaicos, estrutura flutuante, ancoragem e amarração e cabos elétricos (CARVALHO, 2020; RAMASAMY; MARGOLIS, 2021).

De acordo com o Choi (2014), as principais partes do sistema mostradas na Figura 5, são:

- Sistema flutuante*: um corpo flutuante (estrutura + flutuador) que permite a instalação do módulo fotovoltaico.
- Sistema de amarração*: pode ajustar-se às flutuações do nível da água, mantendo a sua posição na direção sul.
- Sistema PV*: equipamento de geração fotovoltaica, semelhante às caixas de junção elétrica, que são instalados em cima do sistema flutuante.
- Cabo subaquático*: transfere a energia gerada do sistema fotovoltaico.

Figura 5: Esboço de plantas flutuantes fotovoltaicas



Fonte: Choi (2014). Adaptado.

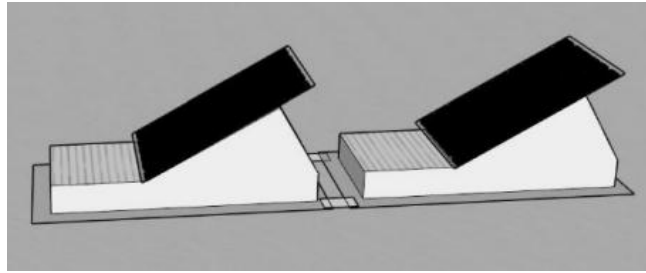
Desde o ano de 2011, o foco se direcionou para o sistema solar flutuante, o qual foi implantado em vários países como o Japão, Coréia do Sul e Estados Unidos. Em 2016, no Brasil, foram apresentados projetos piloto nas usinas hidrelétricas de Balbina e Sobradinho. De fato o contexto brasileiro apresenta um grande potencial para o uso de sistemas fotovoltaicos flutuantes, devido a grandes quantidades de corpos d'água. Além disso, é possível compartilhar da infraestrutura de transmissão já existente nas barragens das hidrelétricas, o que ajuda a maximizar a capacidade de geração de energia (GALDINO; OLIVIERI, 2017).

2.4.1 Sistema flutuante

A estrutura de um sistema fotovoltaico flutuante é muito parecida com o sistema convencional, o que difere são: o sistema de ancoragem, o sistema de flutuação e os cabos de conexão da usina.

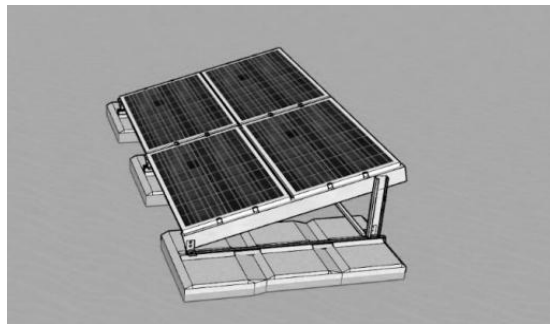
Existem vários tipos de topologias para os módulos fotovoltaicos flutuantes, porém os mais comuns são: os flutuadores puros, as balsas modulares e as membranas. Os flutuadores puros são projetados para que os módulos solares sejam fixados diretamente no dispositivo flutuante como bóias ou pontões, ou seja; não necessita de uma estrutura separada como mostra a Figura 6. As balsas modulares presentes na Figura 7, envolve uma estrutura metálica ou de HDPE para suportar os módulos, e essa estrutura é conectada a um flutuador. Nestes dois sistemas é importante manter as placas no ângulo de inclinação ideal para captar a luz solar (Dnv.Gl, 2021).

Figura 6: Esquema de flutuadores puros.



Fonte: Dnv.Gl (2021).

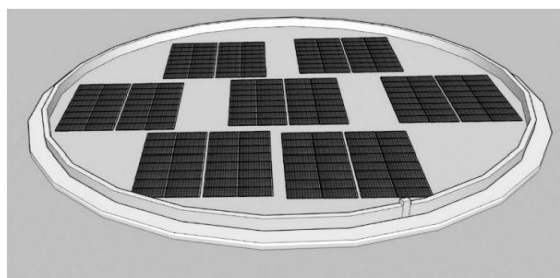
Figura 7: Esquema de balsas modulares



Fonte: Dnv.Gl (2021).

No sistema flutuante de membrana como mostra a Figura 8, os módulos fotovoltaicos são colocados diretamente sobre uma membrana reforçada suportada por anel tubular que fornece flutuabilidade. Esse tipo de sistema fica em contato direto com a água, como mostra a imagem (Dnv.Gl, 2021).

Figura 8: Esquema de flutuadores membrana



Fonte: Dnv.Gl (2021).

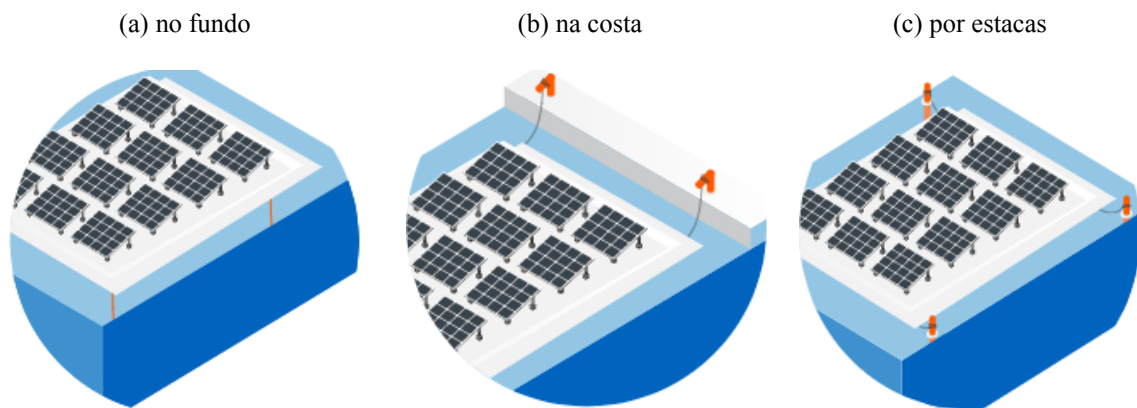
2.4.2 Sistema de fixação e ancoragem

O sistema de fixação e ancoragem é essencial para fixar o sistema de flutuação no corpo d'água e manter a plataforma na posição com maior estabilidade e segurança do

complexo durante as mudanças naturais, tais como; a variação do nível da água e o vento (SUNLUTION, 2021). O sistema de ancoragem é composto por linhas de amarração e âncoras que transferem os esforços recebidos da plataforma para o fundo do reservatório, ou seja; o solo (RODRIGUES; RAMALHO; MEDEIROS, 2020). Segundo Rodrigues *et al* (2020) “os principais fatores que influenciam a escolha da ancoragem são: direção e intensidade dos ventos e da correnteza; profundidade do reservatório; variação de nível d’água; tipo de solo do fundo do lago; características químicas da água; exigências específicas do local.”

As estruturas de ancoragem variam de acordo com o tipo de reservatório, podendo ser simples ou complexos. Os tipos mais comuns de ancoragem consistem em três: ancoragem no fundo, ancoragem na costa e estaca como mostra a Figura 9.

Figura 9: Tipos de ancoragem.



Fonte: Iberdrola (2023).

A ancoragem no fundo, Figura 9a é a mais utilizada devido a flexibilidade e por ser mais apta, podendo ser feita com bloco de concreto e âncoras que estão conectadas à plataforma por meios de cabos de amarração, porém com custos elevados devido ao planejamento cauteloso e por envolver mergulhadores. Já a ancoragem na costa, Figura 9b, é mais simples e econômica, permitindo ser projetada para locais rasos, pequenos e onde o fundo do reservatório não permite qualquer tipo de ancoragem. E por último a de estacas, Figura 9c, em que envolve a perfuração no fundo do corpo d’água até atingir o solo resistente, onde serão fixadas, e então conectadas a plataforma. Essa configuração permite que a plataforma atenda o nível da água, assim garante a estabilidade da estrutura (ACHARYA; DEVRAJ, 2020).

2.4.3 Cabos e equipamentos elétricos

A instalação dos cabos dos sistemas fotovoltaicos flutuantes (SFF) exige um planejamento cauteloso desde a fase inicial até a implementação. Devido às condições naturais como vento e nível da água e aos parâmetros elétricos de tensão e corrente do cabo, é importante levar em consideração a necessidade de comprimento extra para os cabos elétricos. Isso é essencial para suportar qualquer movimentação da plataforma flutuante para que não haja tensão excessiva que possa levar a ruptura (ACHARYA; DEVRAJ, 2020).

A energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é, em corrente contínua, transportada por cabos até os inversores e transformadores; depois do processamento dessa energia por esses equipamentos, esta pode ser injetada na rede elétrica. Atualmente nos projetos de usinas solar flutuantes os cabos se mantêm na superfície da água e é importante que estes e as caixas de derivação tenham a classificação IP67, garantindo proteção contra água e prolongando a vida útil do sistema (YOUSUF; KHOKHAR; ZAHID; KIM; KIM; CHO; CHO; YI, 2020).

O inversor é um dispositivo eletrônico considerado um dos componentes do sistema fotovoltaico importante. O papel fundamental do equipamento é assegurar um bom desempenho em produtividade e segurança do sistema quando realiza a conversão da corrente contínua (CC) que recebe dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA), sincronizando com a frequência e a tensão da rede elétrica (ZILLES *et al.*, 2012). Na Figura 10 apresenta-se um inversor de corrente CC/CA.

Figura 10: Inversor CC/CA



Fonte: SOLIS (2019)

O inversor ainda possui outras funções:

- *Rastreamento do Ponto de Máximo de Potência (MPPT)*: monitora constantemente a tensão e a corrente elétrica do sistema para maximizar a

potência elétrica que varia de acordo com a intensidade da radiação solar incidente (PEREIRA; GONÇALVES, 2008).

- *Desconexão e isolamento*: o inversor é responsável em garantir a desconexão do sistema fotovoltaico a rede elétrica e do lado CC, quando detectar variações nos níveis de tensão, corrente e frequência fora da faixa aceitável (PEREIRA; GONÇALVES, 2008).
- *Relatório de informação*: pode apresentar um painel de informação (*display*), que permite a visualização dos parâmetros de entrada e saída do sistema. Além disso, as informações armazenadas no *data-logger* são úteis para monitorar o desempenho do sistema (PEREIRA; GONÇALVES, 2008).

As configurações de inversores mais comuns em sistemas fotovoltaicos são dois: inversor *string* e microinversores. O inversor *string* suporta potências mais altas e os módulos são conectados em série, ou seja, lida com a capacidade total do sistema, o que significa que se um módulo solar estiver sombreado ou com mau desempenho afeta todo o sistema e é instalado em um local centralizado. Os microinversores operam em baixas tensões e otimizam individualmente a geração de energia independente dos outros módulos do sistema, sendo capazes de lidar com o sombreamento e o monitoramento individual de cada módulo. A escolha entre as configurações depende das características e necessidades do projeto, levando em consideração o tamanho do sistema, o *layout* dos módulos solares, a presença de sombreamento e a necessidade de monitoramento individual (COLODETTE, 2019).

O transformador é um componente importante em circuitos elétricos e eletrônicos, bem como em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Ele permite que sejam realizadas adequações nos níveis de tensão e corrente elétrica de forma eficiente e de acordo com o uso (SIMONE, 2012).

Nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, os transformadores elevam a tensão para a transmissão a longas distâncias e reduzem para distribuição para diversos tipos de consumidores em níveis adequados. Além disso, a construção de um transformador é simples, robusta e durável, não possui peças móveis, pode ser exposto às intempéries, sem necessidade de atenção e possuindo uma manutenção restrita e simples (SIMONE, 2012).

A integração do inversor ao transformador é feita usando cabos de média tensão, sendo possível acondicionar todos os equipamentos para conversão e conexão de energia em

um único espaço. Esse espaço pode ser uma estrutura como *containers*, edificações de alvenaria ou pré-moldadas onde são acomodados todos os equipamentos: inversor, transformador, dispositivos de proteção e controle, entre outros componentes. Essa integração pode simplificar a instalação e o gerenciamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (MIRANDA, 2016).

2.4.4 Tipos de módulos fotovoltaicos

O módulo fotovoltaico converte a radiação solar elétrica, porém a conversão não se dá pelo calor, inclusive altas temperaturas podem ocasionar uma diminuição no rendimento da geração elétrica. Essa conversão depende dos materiais semicondutores que produzem o efeito fotovoltaico. Quando uma célula fotovoltaica é atingida por um fóton luz, um potencial elétrico é formado (REIS; FADIGAS; CARVALHO, 2019).

As células fotovoltaicas são produzidas por lâminas de silício cristalino, que podem ser fabricadas na forma de silício monocristalino, policristalino e amorfo com uma área entre 50 cm² e 150 cm² e espessura entre 0,2 mm e 0,3 mm; possuindo um aspecto uniforme com uma cor azul escuro e preto.

A célula de silício monocristalino, Figura 11, é a tecnologia mais encontrada nos sistemas de geração de energia solar. Ela possui uma produção básica, com alta eficiência e um alto grau de pureza de 99,9999% aproximadamente, garantindo o desempenho da célula. O processo de formação é chamado método de Czochralski, em que os blocos de silício ultrapuros são aquecidos em temperaturas elevadas resultando em um lingote de silício monocristalino, possuindo uma organização molecular homogênea com um aspecto brilhante e uniforme. Com eficiência entre 15% a 18% (NEVES, 2015).

Figura 11: Célula fotovoltaica de silício monocristalino.

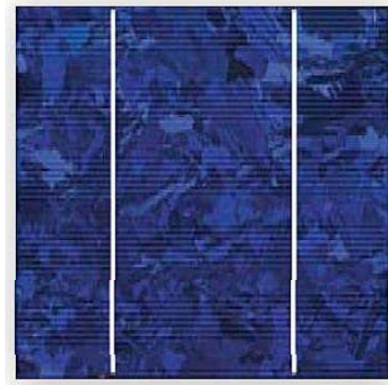


Fonte: Neves(2015).

A célula de silício policristalino, na Figura 12, possui um custo inferior da célula de silício monocristalino e uma preparação menos rigorosa, porém com eficiência inferior. O

lingote é formado por um conjunto de cristais com diferentes tamanhos e orientações e possuindo um aspecto rugoso. As células fotovoltaicas são heterogêneas e na cor azul com uma eficiência entre 13% a 15% (NEVES, 2015).

Figura 12: Célula fotovoltaica de silício policristalino.



Fonte: Neves (2015)

A célula de silício amorfo presente na Figura 13, é uma tecnologia recente, sua produção é diferente das células convencionais. São fabricadas depositando camadas finas de materiais de silício e outros em uma base rígida ou flexível. O processo realizado é o de vaporização em elevadas temperaturas, permitindo pequenas quantidades de matéria prima e reduzindo os custos da produção. Em comparação com as demais células sua eficiência é muito baixa entre 5% a 9% o que tem impedido a substituição do Si cristalino (NEVES, 2015).

Figura 13: Célula fotovoltaica de silício amorfo.



Fonte: Marjorya (2017).

2.4.5 Desafios e oportunidades das usinas flutuantes

A tecnologia flutuante é um método inovador e que traz muitos benefícios para países em que o espaço é insuficiente para uma implantação de um sistema solar em larga

escala. Os governos estão sempre buscando investir e intensificar pesquisas para o uso das fontes renováveis de uma forma mais sustentável. A velocidade da utilização de fonte de energia convencional está aumentando, então técnicas estão sendo implementadas para preservar esses recursos hídricos. Uma técnica para solucionar esse problema é a instalação de sistema fotovoltaico em corpo d'água, uma vez que economiza as terras para outras atividades como a agricultura. Outros benefícios que essa inovação oferece são: evitar terras valiosas, o resfriamento da água e do vento que aumenta a eficiência na produção de energia, reduz a evaporação da água, reduz o crescimento de algas; diminui a degradação do módulo devido a temperatura baixa; menos poeira, porém propenso a queda de pássaros; maior rendimento com módulos bifaciais; favorável a sistemas híbridos de hidroelétricos e sistema fotovoltaico, pois aproveita a estrutura já existente de transmissão de energia; e a simplicidade de instalação e dimensionamento por não precisar de nível de solo e nem ter interferência do sombreamento (KUMAR *et al.*, 2021).

3. METODOLOGIA

A construção de uma usina fotovoltaica flutuante envolve várias etapas durante o planejamento e a execução, os principais passos são: preparação do local, montagem do flutuador, construção da ancoragem, montagem dos componentes, conexões e instalação elétrica, e a manutenção. Durante a elaboração do projeto da usina, foi necessário utilizar três *softwares*: Google Earth Pro, ArcGIS e Radiasol 2; além de dados dos portais da CRESESB e FUNCEME e os *Datasheet's* dos componentes elétrico.

Figura 14: Fluxograma das etapas do estudo



Fonte: Autoria própria (2023).

Depois de analisar todos os dados, em seguida foi necessário escolher o modelo do flutuador e realizar a medição da área e verificar quantas unidades seriam utilizadas. O cálculo da área do flutuador foi realizado pela equação (1):

$$A = [C] * [L] \quad (1)$$

Onde: [C] - comprimento do flutuador

[L] - largura do flutuador

Com a área do flutuador determinada, foi possível calcular a quantidade de módulo por flutuador. Com a quantidade de módulo, calcula-se a área total de módulos, utiliza-se então na fórmula global que estima a energia gerada.

Para realizar o cálculo de saída de energia, foi levado em consideração a eficiência do painel e a irradiação global multiplicada pela área do painel, a eficiência de conversão de CC para CA e o transporte da energia para o ponto de consumo. Segundo Saur News Bureau (2016), estima-se a eletricidade gerada na saída do sistema fotovoltaico pela equação (2):

$$E = [A] * [r] * [H] * [PR] \quad (2)$$

Onde: [A] - área total do conjunto de módulos (m²);

[r] - rendimento do módulo fotovoltaico (%), obtido pela razão entre a potência elétrica de pico (kWp) e a potência incidente na área do módulo;

[H] - radiação média anual em painéis inclinados (sombreamentos não incluídos) (kWh/m²);

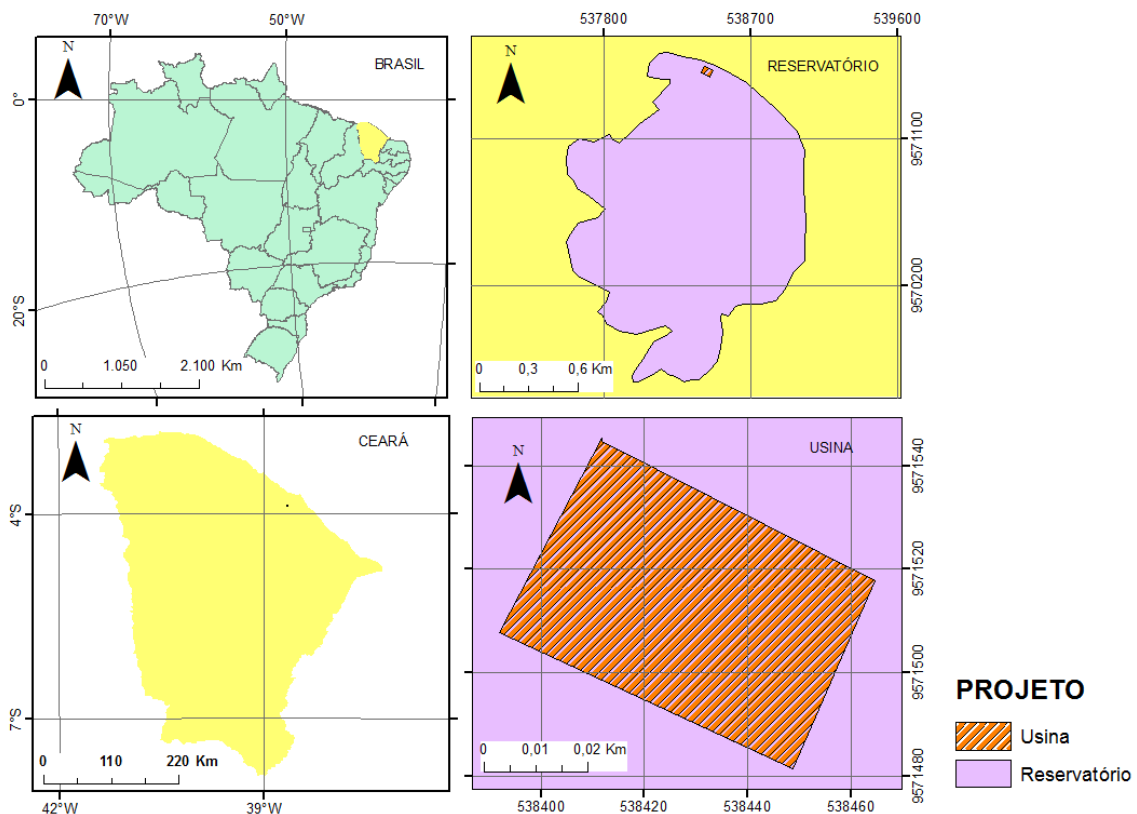
[PR] - taxa de desempenho constante para perdas, coeficiente de perdas (faixa entre 0,5 e 0,9, valor padrão 0,75).

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Localização da área de estudo

A área de estudo corresponde ao reservatório da barragem do rio Maranguapinho, localizado na cidade de Maranguape, região metropolitana de Fortaleza, Ceará representado na Figura 15.

Figura 15: Área delimitada da usina fotovoltaica flutuante



Fonte: Autoria própria (2023)

O reservatório da barragem do rio Maranguapinho como mostra a Figura 16 teve sua construção concluída no ano de 2012, no entanto somente no ano de 2015 que a avaliação da variação de volume armazenado começou a ser compreendido. Ele possui um volume de $9.350.000\text{m}^3$ e uma área de 3 km^2 . A sua construção foi em função da retenção das cheias, mas devido à escassez hídrica, está sendo utilizado para abastecer a sede do município de Maranguape e outras localidades próximas (COGERH, 2018).

Para a instalação da usina fotovoltaica flutuante a porção de área delimitada no reservatório possui perímetro de 205,16 m, área de $2500,48\text{ m}^2$ e suas coordenadas geográficas:

latitude (-3.87653°) e longitude (-38.6539°), dados estes extraído pelo *software* de geoprocessamento ArcGIS.

A escolha dessa área mais próxima a um ponto de conexão com a rede da concessionária, tem como finalidade economizar os cabos elétricos necessários e reduzir as perdas elétricas.

Figura 16: Reservatório da barragem do rio Maranguapinho via satélite.



Fonte: Google Earth (2023).

4.2 Profundidade do reservatório, solo, variação do nível da água e velocidade do vento

A profundidade do local no reservatório e o tipo de solo são essenciais para definir qual tipo de ancoragem a ser utilizado.

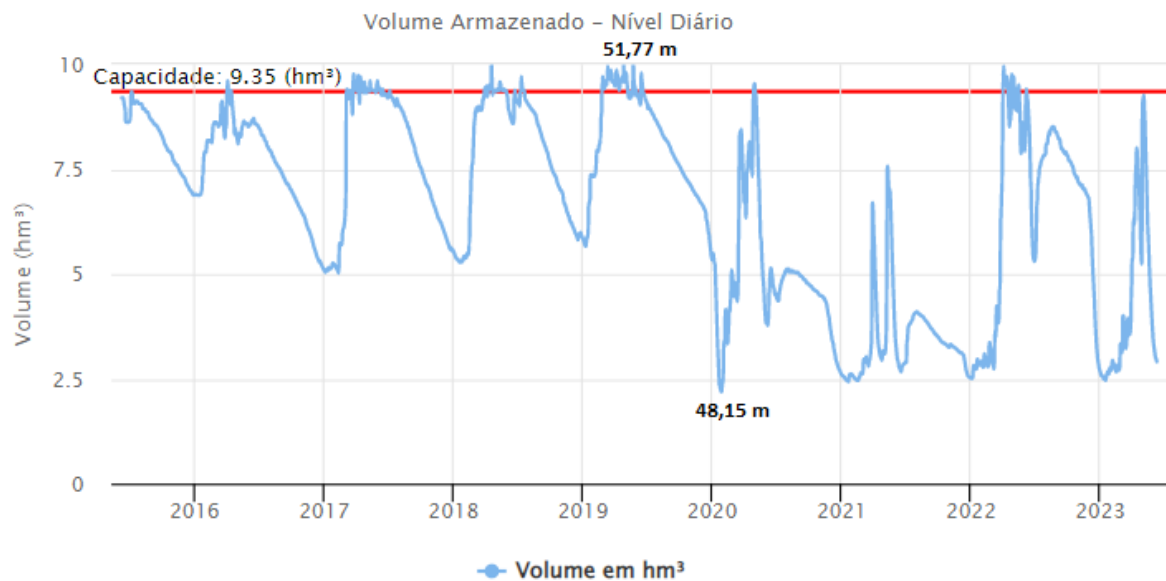
Segundo o ArcGIS, o único solo presente no reservatório é o argilossolo, que possui um alto teor de argila em subsuperfície e pode ser encontrado em cores acinzentados e avermelhados.

A FUNCEME disponibiliza, em seu portal, os dados de acompanhamento da armazenagem de água no reservatório desde a fase inicial até os dias atuais. A profundidade do reservatório será considerada a cota da soleira do vertedouro. Esses fatores definem o tipo de

ancoragem que mais se adequa ao local.

Dessa forma, os dados da variação do nível da água utilizados neste trabalho foram de Junho/2015 a Maio/2023. Na Figura 17, pode-se observar que o maior nível da água ocorreu no mês de Maio/2019 e o menor no mês de Janeiro/2020, durante o período monitorado houve uma variação de 3,62 m; e a cota da soleira do vertedouro mede 51,5 m e um volume máximo de 9,35 hm³ (FUNCEME, 2023).

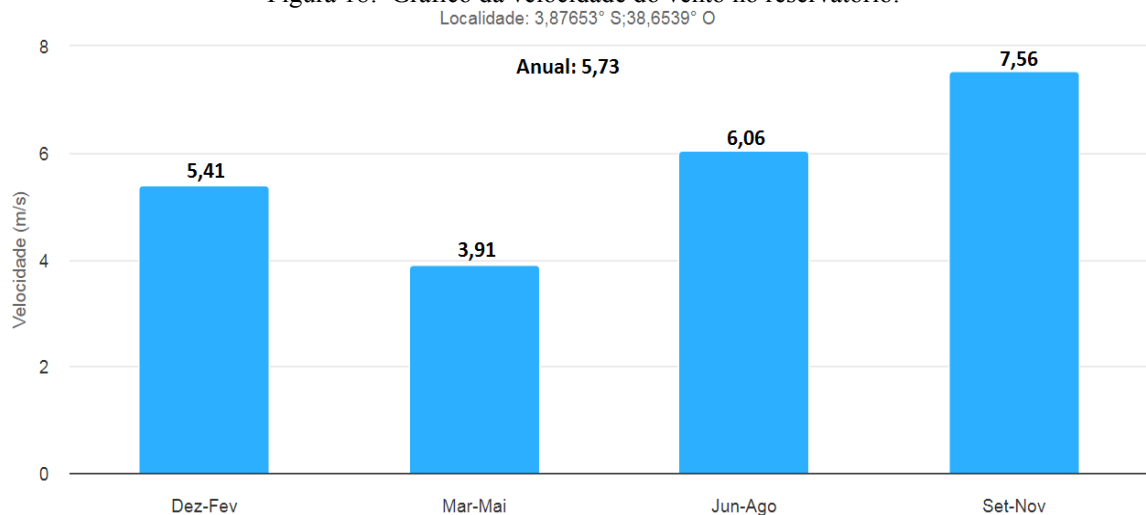
Figura 17: Gráfico da variação do nível da água do reservatório.



Fonte: FUNCEME (2023)

Os dados de velocidade do vento para o local foram obtidos através do portal Potencial Eólico da CRESESB. São inseridas as coordenadas geográficas (latitude e longitude) do ponto de estudo, com isso, a velocidade do vento mensal e anual é fornecida, como mostra a Figura 18.

Figura 18: Gráfico da velocidade do vento no reservatório.



Fonte: CRESESB (2023).

4.3 Potencial de Irradiação solar, temperatura ambiente e nível de umidade no local

Na Figura 19 é apresentada a interface de entrada do *software* Radasol 2, na qual informa-se as coordenadas geográficas do local de estudo, barragem do rio Maranguapinho, e o ângulo de inclinação sugerido pelo *software* para extrair os dados da irradiação média global que é dada em kWh/m²/dia.

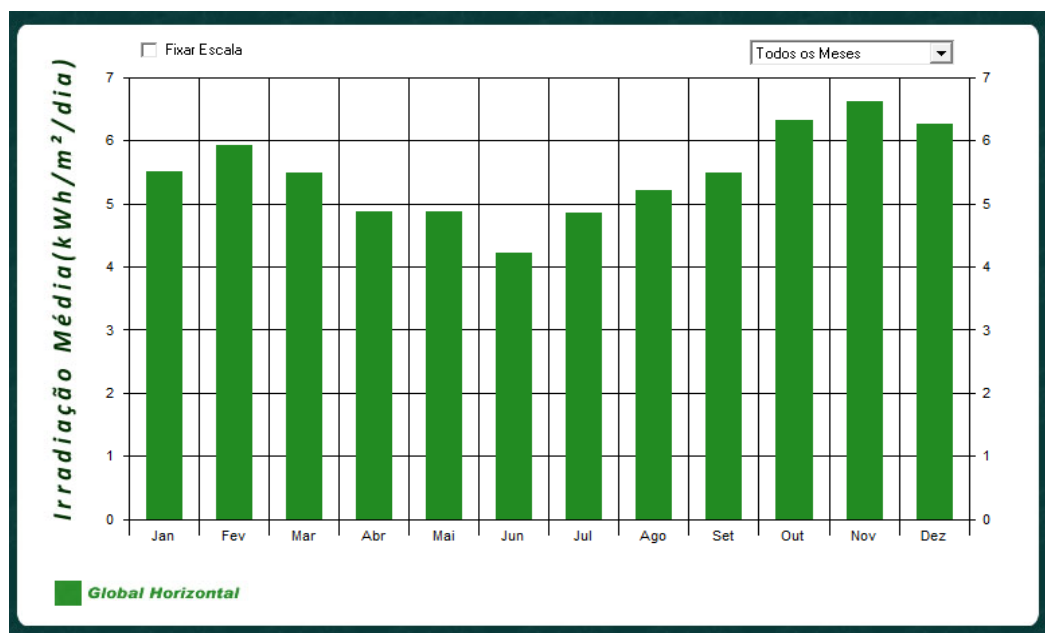
Figura 19: Dados inseridos no Radasol 2

The screenshot shows the input interface of the Radasol 2 software. It includes fields for 'Localização' (Barragem do Rio Maranguapinho), 'Azimute' (0), 'Latitude' (-3.88), 'Longitude' (-38.65), and 'Inclinação' (10). Under 'Tipo de Radiação', the 'Global Horizontal' option is selected, while 'Inclinada', 'Difusa Inclinada', 'Direta Inclinada', and 'Temperatura Ambiente' are unchecked.

Fonte: Radasol 2 (2023)

Na Figura 20 mostra-se o gráfico de saída do *software* mostrando a irradiação média global durante os 12 meses do ano. Pode-se perceber que a maior irradiação foi no mês de novembro ultrapassando 6 kWh/m²/ dia.

Figura 20: Gráfico da radiação solar média global



Fonte: Radasol 2 (2023)

Na Tabela 1, os dados de saída fornecidos pelo programa RadiaSol 2 são apresentados com médias mensais. Esses dados serão utilizados para realizar os cálculos de geração de energia solar em uma área de 2500,48 m².

Tabela 1: Dados extraídos do Radiasol 2

MÊS	IRRADIAÇÃO MÉDIA GLOBAL (kWh/m ² /dia)	TEMPERATURA AMBIENTE (MÉDIA - °C)	UMIDADE RELATIVA
JANEIRO	5,52	25,8	75
FEVEREIRO	5,93	25,2	75
MARÇO	5,48	28,2	81
ABRIL	4,88	25,5	79
MAIO	4,88	27,0	81
JUNHO	4,21	26,2	81
JULHO	4,85	23,7	87
AGOSTO	5,21	25,4	75
SETEMBRO	5,49	27,5	67
OUTUBRO	6,32	27,7	73
NOVEMBRO	6,63	27,0	74
DEZEMBRO	6,27	24,1	74
MÉDIA	5,47	26,10	76,83

Fonte: Radiasol 2 (2023) (Adaptado)

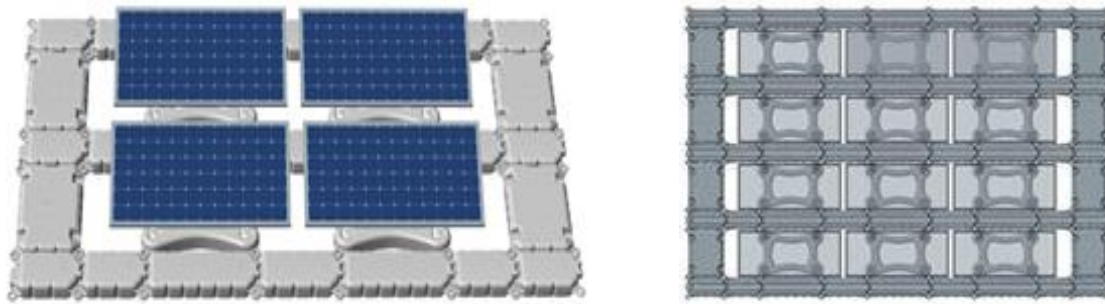
4.4 Determinação dos componentes do sistema

4.4.1 Flutuador e ancoragem

O flutuador escolhido para a usina flutuante foi o modelo BC-003F da fabricante chinesa FOST Solar. Ele é produzido com o material HDPE, PP e aço inoxidável. O flutuador possui um comprimento de 8,23 m e largura de 1,465 m; acomodando 3 módulos fotovoltaicos, permitindo uma inclinação de ângulo entre 5° a 15° e suportando velocidade do vento até 42 m/s.

O sistema possui um *design* modular, que permite a realização de uma matriz de fileira com módulos fotovoltaicos na mesma face como mostra a Figura 21. Com esse *design* aumenta a eficiência da geração de energia solar e a capacidade de instalação. Além disso, a instalação é mais fácil, o que ajuda a economizar nos custos. A sua vida útil é de 25 anos o que garante um retorno do investimento positivo ao longo do tempo.

Figura 21: Sistema de flutuação BC-003F



Fonte: Fost Solar (2023).

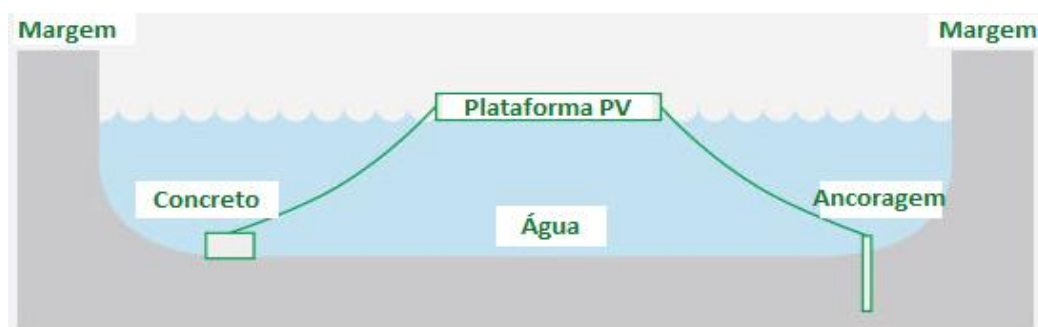
A área disponibilizada para a construção da usina é de 2500,48 m² e o flutuador possui uma área de 12,05 m². Então para encontrar a quantidade de flutuadores para a usina é realizado o cálculo pela equação (3):

$$N^{\circ} = \frac{\text{Área da usina}}{\text{Área do flutuador}} \quad (3)$$

O número de flutuadores encontrado é de 207, mas será usado apenas 200. O flutuador escolhido da Fost Solar acomoda 3 módulos, portanto, a usina deve ter 600 módulos fotovoltaicos.

A instalação do sistema de ancoragem foi projetada de acordo com a variação do nível da água e a profundidade do reservatório. Conforme a empresa MIBET ENERGY, o reservatório que tem uma variação for superior a 3 metros, o tipo de ancoragem mais adequada para o projeto é a de fundo. Utiliza-se dessa forma uma âncora ou um bloco de concreto amarrados com cabos cabrestante, juntamente com uma mola elástica para fixar a ancoragem (ENERGY, 2023). A Figura 22 mostra como funciona o sistema.

Figura 22: Sistema de ancoragem do projeto



Fonte: ENERGY (2023).

4.4.2 Módulo Fotovoltaico

A escolha do módulo fotovoltaico foi importante, pois visa minimizar os custos e maximizar a potência do painel. O módulo fotovoltaico escolhido é da fabricante Risen Energy, o modelo TITAN RSM40-8-405M, com 120 células ligadas em série de silício monocristalino, excelente resistência PID (*Degradation Potential Induced by Potential Difference*), o que significa que o módulo tem uma menor degradação induzida por potencial; e possui uma garantia de potência linear de 25 anos. A Tabela 2 apresenta a ficha técnica com as características do módulo.

Tabela 2: Parâmetros do módulo TITAN RSM40-8-405M

Potência Nominal em Watts-Pmax (Wp)	405
Tensão de Circuito Aberto-Voc (V)	41,60
Corrente de Curto-Circuito-Isc (A)	12,40
Tensão de Potência Máxima-Vmpp (V)	34,64
Corrente de Potência Máxima-Impp (A)	11,70
Eficiência do Módulo (%)	21,1
Dimensões do Módulo	1754×1096×30mm
Taxa de desempenho (%) (padrão)	75%
Peso (Kg)	22
Temperatura de Operação	-40°C a +85°C
Área do Módulo (m²)	1,92
Coefficiente de temperatura (Voc)	-0,104V/ °C
Coefficiente de temperatura (Isc)	0,04%/ °C

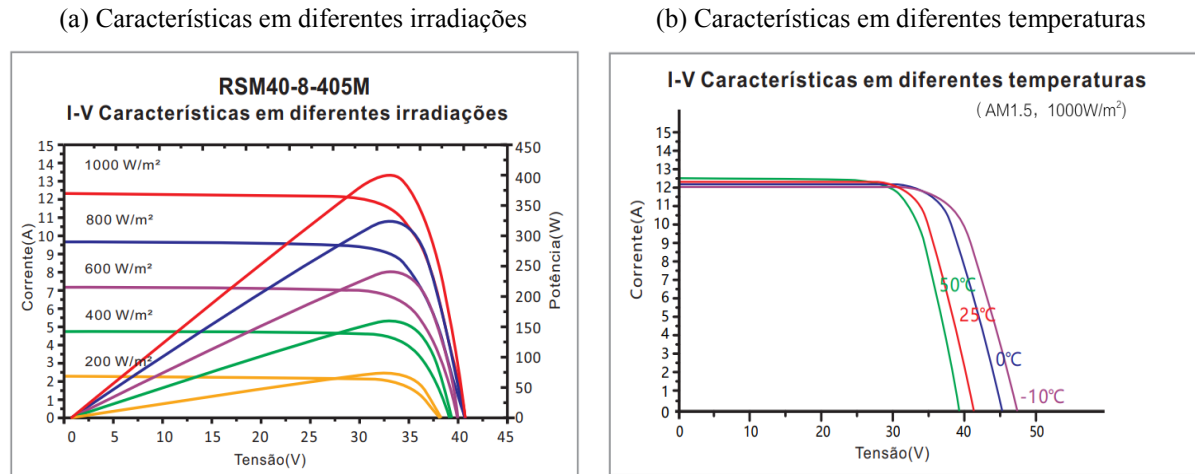
Fonte: ENERGY RISEN (2022) adaptado.

As especificações do módulo presente na tabela 2 são referentes as condições de testes padrões (STC), com irradiação solar 1000W/m² e 25°C.

Na Figura 23 (a) são apresentadas simultaneamente duas curvas; a primeira é a de Corrente *versus* Tensão do módulo RSM40-8-405M, para irradiâncias com variações entre 200 W/m² a 1000 W/m²: a corrente aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar, enquanto a tensão teve um aumento logarítmico. Já a segunda curva é de Potência *versus* Tensão, que apresenta o máximo global da curva, o ponto de máxima de potência (MPPT) gerada pelo módulo fotovoltaico. A Figura 23 (b) mostra que com o aumento da temperatura,

ocorre elevação de corrente e uma perda de tensão, reduzindo assim a produção de energia.

Figura 23: Curvas do módulo fotovoltaico RSM40-8-405M.



Fonte: ENERGY RISEN (2022).

Como visto, para a área delimitada a quantidade de módulos utilizados deve ser de 600. Entretanto, esse número pode ser modificado para obter uma configuração compatível entre módulos e inversores. Portanto, a área total dos módulos preliminar é obtida pela equação (4):

$$\text{Área útil} = n * \text{Área do módulo} \quad (4)$$

Assim, a área útil da usina para produção fotovoltaica é de 1.152 m². Já a potência da usina é encontrada pela equação (5):

$$\text{Potência} = n * \text{Potência do módulo} \quad (5)$$

A potência encontrada foi de 243 kW, valor utilizado para calcular o número de inversores e, posteriormente, definir a configuração na ligação dos módulos em série e em paralelo.

4.3.3 Inversor

O inversor desempenha o papel em converter a energia produzida nos módulos fotovoltaicos em uma forma adequada aos padrões da rede elétrica local, monitorar

constantemente os parâmetros elétricos e garantir que estejam dentro dos limites esperado, além de oferecer proteção e segurança ao sistema e as pessoas envolvidas no uso da energia fotovoltaica.

A marca do inversor escolhido foi da Ginlong Solis, o modelo 5S-GC100K, que possui uma excelente eficiência, segurança, economia e inteligência.

Para realizar o dimensionamento do sistema, o inversor contará com a potência total a ser instalada de 243 kW. Considerando que serão utilizados 600 módulos fotovoltaicos, o sistema foi dividido, pois serão necessário dois inversores de 100 kW, cada um possui 10 MPPTs e 20 entradas, como mostra o *Datasheet* na tabela 3.

Tabela 3: *Datasheet* do inversor Ginlong Solis 5S-GC100K(trifásico)

MODELO 5S-GC100K (TRIFÁSICO)	DADOS GERAIS
Faixa de temperatura ambiente de operação	-30 ~ +60°C
Potência máxima de entrada	150kW
Tensão máxima de entrada	1100V
Tensão nominal	600V
Intervalo de tensão MPPT	180-1000V
Corrente máxima de entrada	10*32A
MPPTs / N° de entradas	10/20
Potência nominal de saída	100kW
Corrente máxima de saída	167,1A
Eficiência máxima	98,7%
Frequência nominal da rede	50Hz / 60Hz
Harmônicas	< 3%

Fonte: SOLIS (2019)

4.4.4 Configuração do sistema fotovoltaico

Para determinar a configuração do sistema fotovoltaico é necessário considerar as especificações técnicas do inverso como a faixa de tensão de entrada (CC) e a corrente máxima de entrada (CC) que o inversor suporta. Logo, deve-se calcular a tensão de MPPT corrigida levando em consideração as temperaturas, visando os pontos críticos do sistema fotovoltaico.

A equação 7 pode-se obter a correção da tensão de MPPT nos limites de temperatura.

$$V_{mppt_corrigida} = V_{mppt_módulo} + (T - 25) * \alpha \quad (7)$$

Onde: $V_{mppt_módulo}$ - tensão de MPPT do módulo fotovoltaico;

T - temperatura de operação no módulo fotovoltaico;

α - coeficiente de temperatura de V_{oc} .

A V_{mppt} máxima corrigida ocorre quando a temperatura do módulo for mínima, a -40°C , resultou em uma tensão de 41,4 V. E a V_{mppt} mínima corrigida ocorre quando a temperatura do módulo for máxima, nesse caso $+85^{\circ}\text{C}$, resultou em uma tensão de 25,9 V.

Com as V_{mppt} corrigidas, foram calculados a quantidade máxima e mínima de módulos ligados em série por *string* pela equação 8:

$$Q = \frac{V_{mppt_inversor}}{V_{mppt_corrigida}} \quad (8)$$

Onde: $V_{mppt_inversor}$ - tensão de MPPT do inversor (máxima / mínima)

$V_{mppt_corrigida}$ - tensão de MPPT (máxima / mínima) corrigida do módulo.

Dessa forma a quantidade mínima de módulos por *string* para o inversor começar a operacionalizar, resultou em 7 módulos. E a quantidade máxima de módulos por *string* que o inversor suporta, resultou em 24 módulos.

Para realizar o dimensionamento de compatibilidade de corrente máxima por *string* é usado a seguinte equação 9:

$$I_{sc_corrigida} = I_{sc_módulo} * (1 + (T - 25) * \beta) \quad (9)$$

Onde: $I_{sc_módulo}$ - corrente de curto-circuito do módulo;

T - temperatura máxima de operação do módulo

β - coeficiente de temperatura na corrente de curto circuito.

A corrente de curto-circuito corrigida do módulo resultou em 12,69 A, então dessa forma 2 *string* por MPPT suporta uma corrente de 25,38 A, sendo menor do que o limite de entrada no inversor, que é de 32 A, indicando que o inversor pode operar normalmente.

A Tabela 4 apresenta a organização da distribuição dos módulos em 15 *strings* conectados a 10 MPPT's em 2 inversores.

Tabela 4: Arranjo do sistema fotovoltaico

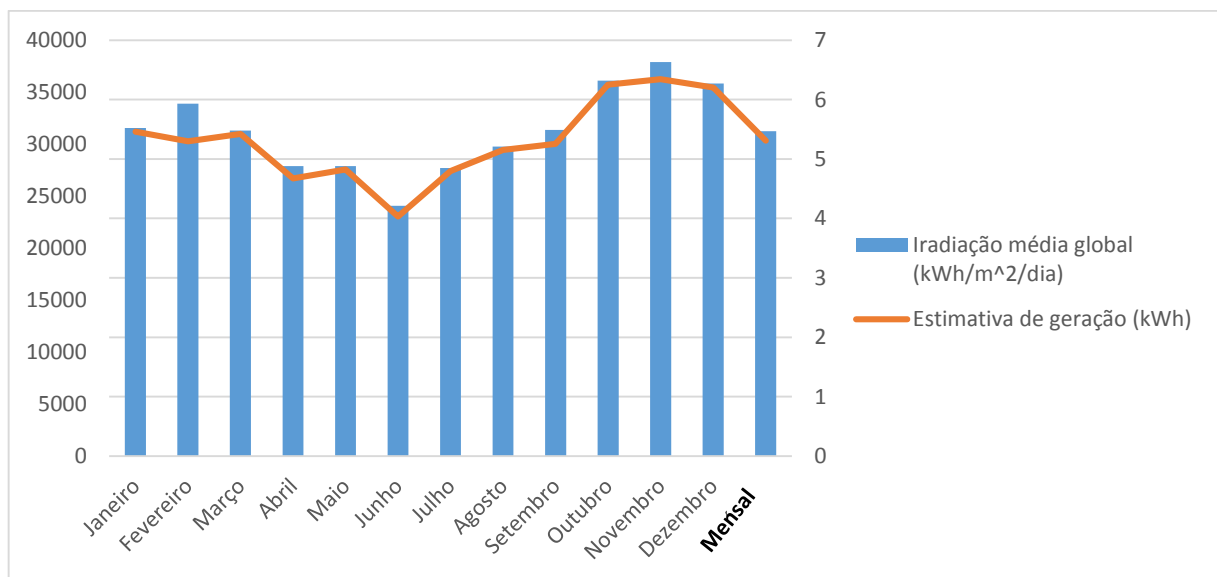
Descrição	Inversor 1	Inversor 2
Nº de <i>string</i>	20	20
Nº de módulos por <i>string</i>	15	15
Tensão por <i>string</i>	621V	621V
Total de módulos	300	300

Fonte: Autoria Própria (2023)

4.5 Energia gerada

A área escolhida no reservatório para o projeto foi de 2.500,43 m². Para o projeto foi colocado em estudo 600 módulos fotovoltaicos com eficiência de 21,1% e adotou-se um valor para a taxa de desempenho de 75%. Com a equação (2) foi encontrada a estimativa de geração de energia, para a área de 1.152 m² para a captura da irradiação solar como mostra o Gráfico 1:

Gráfico 1: Geração de energia



Fonte: Autoria Própria (2023).

Os resultados obtidos na simulação apresentaram variações significativas na geração elétrica ao longo do ano, devido às diferenças na irradiância solar. No mês de junho uma geração mínima de 23.025,00 kWh, quando a irradiância foi menor nesse período, enquanto no mês de novembro com maior irradiância houve uma geração máxima de 36.260,27 kWh. A média mensal de energia elétrica gerada ao longo do ano pelos 600 módulos fotovoltaicos instalados no reservatório do rio Maranguapinho foi de 30.334,93 kWh.

5. CONCLUSÃO

O crescimento da energia solar fotovoltaica tem sido observado em todo o mundo. Essa expansão mostra que a conscientização sobre os impactos ambientais causados por energias não renováveis como os combustíveis fósseis tem impulsionado governos, empresas e indivíduos a buscar alternativas mais ecológicas e limpas para suprir as necessidades energéticas.

Como resposta tem-se a adoção da energia solar fotovoltaica flutuante, tecnologia essa que difere da convencional, pois ao invés de ser instalada em telhados ou em solo, envolve uma instalação de módulos fotovoltaicos em estruturas flutuantes como plataformas em reservatórios, lagos, e represas; e que precisa de um sistema de ancoragem. No Brasil a tecnologia está em fase de expansão, a iniciativa é vista como forma de diversificar a matriz energética e aproveita a infraestrutura já existentes nos reservatórios de usinas hidrelétricas.

Além disso a água coopera para o aumento da eficiência energética dos módulos e pode reduzir a taxa de evaporação nos corpos hídricos. Isso é benéfico em regiões propensas à economia de água e ainda preserva os recursos hídricos.

O estudo apresentou um dimensionamento de uma estrutura flutuante, composta por flutuadores de HPDE e PP, uma estrutura que atende as especificações técnicas como a velocidade do vento. O dimensionamento da ancoragem em que pode ser utilizada ancoras ou blocos de concretos corda de cabrestante.

O dimensionamento do sistema fotovoltaico foi realizado com ajuda de *softwares* e portais em uma área de 2.500,48 m², na qual foram utilizados 200 flutuadores, 600 módulos fotovoltaicos, produzindo em média 30334,93 kWh de energia elétrica mensalmente.

De acordo com o exposto, resultados expressaram uma contribuição positiva, pois fundamentou sobre sistema fotovoltaico flutuante, um estudo que está em crescimento. E o mesmo contribuirá para estudos futuros com foco nos seguintes pontos: analisar a viabilidade econômica, avaliar o processo de evaporação e evapotranspiração, avaliar as características da água e avaliar o tipo de ancoragem (tipos de ancoras).

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, Mohit; DEVRAJ, Sarvesh. **Floating Solar Photovoltaic (FSPV): A Third Pillar to Solar PV Sector?** Índia: Teriin, 2020. Disponível em: <https://www.teriin.org/sites/default/files/2020-01/floating-solar-PV-report.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- ANA. **ANA aprimora base técnica sobre evaporação de água de reservatórios no Brasil.** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-aprimora-base-tecnica-sobre-evaporacao-de-agua-de-reservatorios-no-brasil>. Acesso em: 04 jul. 2023.
- ANEEL. **Brasil supera em 2022 os 8 GW de expansão na capacidade instalada. 2023.** Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/brasil-supera-em-2022-os-8-gw-de-expansao-na-c>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- BLUESOL. **Origem da Energia Solar: uma Breve História do Sol como Fonte Energética do Mundo.** 2021. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/origem-da-energia-solar/>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- CARVALHO, Thiago Ferreira de. **Estudo sobre usinas solares flutuantes em reservatórios de água no Brasil: Estudo de caso no Rio Mossoró.** 2020. 11 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/6197>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- CEPEL – CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Gtes, 2014. 530 p. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2022.
- CHOI, Y.-K. **A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact.** International Journal of Software Engineering and Its Applications, v. 8, n. 1, p. 75-84, 2014. ISSN: 1738-9984
- COGERH. **INVENTÁRIOS AMBIENTAIS DE AÇUDES DAS BACIAS METROPOLITANAS: açude maranguapinho. AÇUDE MARANGUAPINHO.** 2018. Disponível em: https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/2018/01/IVA-Maranguapinho_PSH.pdf. Acesso em: 28 maio 2023.
- COLODETTE, José Augusto de Faria. **Uso de micro inversores em sistemas fotovoltaicos – avaliação comparativa e estudo de caso.** 2019. 64 f. Monografia (Especialização) - Curso de Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/32979>. Acesso em: 27 abr. 2023.
- CRESESB (CENTRO DE REFERÊNCIA DAS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA) (Brasil). **Potencial Eólico - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.** 2023. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico. Acesso em: 05 maio 2023.

DNV.GL (Noruega). **Design, development and operation of floating solar photovoltaic systems**. Oslo: Dvn.Gl, 2021. 152 p. Disponível em: <https://www.energiesdelamer.eu/wp-content/uploads/2021/10/08-10-021-Solaire-flottant-DNVGL-RP-0584.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2023.

ENERGY, Mibet. **MRac Floating PV Mounting System**. 2023. Disponível em: https://www.mibetsolar.com/mrac-floating-pv-mounting-system_p133.html. Acesso em: 04 maio 2023.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Expansão da geração 2020**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-466/NT%20Solar%20Fotovoltaica%20Flutuante.pdf>. Acesso em 20 jun 2023.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço energético nacional 2022 – relatório síntese**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em 04 maio 2023.

ESMAP, WORLD BANK GROUP, SERIS. **“Float Solar Market Report 2019 - Where Sun Meets Water”**. – Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/579941540407455831/pdf/Floating-Solar-MarketReport-Executive-Summary.pdf>. Acesso em: 05. Maio. 2023.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Solar Fotovoltaica : Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**: pea ∴2420 produção de energia. São Paulo: Gepea – Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 2012. 71 p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf. Acesso em: 12 mar. 2023.

FUNCEME. **Nível diário por reservatório**. 2023. Disponível em: <http://funceme.br/hidro-ce-app/reservatorios/volume>. Acesso em: 05 maio 2023.

GALDINO, Marco Antonio Esteves; OLIVIERI, Marta Maria de Almeida. **Some Remarks about the Deployment of Floating PV Systems in Brazil**. Journal Of Electrical Engineering ∴. Rio de Janeiro, p. 10-19. jan. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312990302>. Acesso em: 04 abr. 2023.

IBERDROLA (Brasil). **Energia solar fotovoltaica flutuante**: você conhece a energia solar fotovoltaica flutuante?. Você conhece a energia solar fotovoltaica flutuante?. 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/inovacao/fotovoltaica-flutuante>. Acesso em: 26 mar. 2023.

INGOLE, Nitin *et al.* Floating Solar Power Plants: A Review. **International Research Journal Of Engineering And Technology**. Índia, p. 775-779. jan. 2020. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V7/i1/IRJET-V7I1129.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2023.

IPECE (org.). **Panorama da produção de energia elétrica no Estado do Ceará: Um enfoque para a matriz eólica**. Fortaleza: Gerência de Estatística, Geografia e Informação - Gegin, 2018. 33 p. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/12/ipece_informe_141_12_Dez2018.pdf. Acesso em: 30 abr. 2023.

KUMAR, Manish *et al.* **Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems**. Solar Energy Materials & Solar Cells. Índia, p. 1-2. jul. 2021. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024821004505>). Acesso em: 06 abr. 2023.

MAGARREIRO, Clarisse; FREITAS, Sara; BRITO, Miguel Centeno. **Radiação e energia solar**. Gazeta de Física, Lisboa, v. 9, n. 1/2, p. 57-59, jun. 2016.

MARIANO, Juliana D'Angela; URBANETEZ Junior, Jair. **Energia Solar Fotovoltaica: Princípios Fundamentais**. Paraná: Antena, 2022. 139 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/359426299_Energia_solar_fotovoltaica_principios_fundamentais. Acesso em: 09 mar. 2023.

MARJOYA, GADEMA. **Relógios Com Sistema De Energia Solar**. Maria Espanha, 11 jul. 2017. Disponível em: <https://www.marjoya.com/blog/2016/01/25/relojes-sistema-energia-solar/> Acesso em: 15 abr. 2023.

MIRANDA, Renan Maciel. **Projeto de usina de geração fotovoltaica de larga escala em terra no brasil**. 2016. 119 f. Monografia (Especialização) - Curso de Energia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/22190>. Acesso em: 27 abr. 2023.

NEVES, Henrique Bortone. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (sfcr): um estudo de caso**. 2015. 139 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: https://www2.dee.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/18/2017/11/TCC_2015_1_HBNeves.pdf. Acesso em: 04 abr. 2023.

OLIVEIRA, Ilane Caminha de; GUERRA, Fabiana Karla de O. M. Varella. Geração Fotovoltaica no Ceará. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, Mossoró, v. 3, n. 2, p. 38-49, 06 dez. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/r4em/article/download/10567/10797/66816>. Acesso em: 30 abr. 2023.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. **G. Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

PEREIRA, Osvaldo L. S.; GONÇALVES, Felipe F.. **Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso**. Revista Brasileira de Energia, Itajubá, Mg, v. 14, n. 1, p. 25-45, 2008. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/214/195>. Acesso em: 19 abr. 2023.

RAMASAMY, Vignesh; MARGOLIS, Robert. **Floating Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2021 Installations on Artificial Water Bodies**. National Renewable Energy Laboratory, United States, v. 1, n. 1, p. 1-23, 01 out. 2021. Disponível em: [Renhttps://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80695.pdf](https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80695.pdf).. Acesso em: 16 mar. 2023.

REBOLLAR, Paola Beatriz May; RODRIGUES, Paulo Roberto. **Energias Renováveis Energia Solar**. Brasil: Livro Digital, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/259868130>. Acesso em: 10 mar. 2023.

REIS, Lineu Belico dos; FADIGAS, Eliane A.F. Amaral; CARVALHO, Cláudio Elias. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 3. ed. Barueri, Sp: Manole Ltda, 2019.

RENZO, Marcus *et al.* **Benefícios do inversor de frequência na geração distribuída fotovoltaica: a engenharia de produção e suas contribuições para o desenvolvimento do brasil::**. In: XXXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO, 23., 2018, Maceió, Alagoas. **Anais [...]**. Maceió: Abepro, 2018. p. 1-10. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_266_526_35096.pdf. Acesso em: 03 abr. 2023.

RODRIGUES, Italo Sampaio; RAMALHO, Geraldo Luis Bezerra; MEDEIROS, Pedro Henrique Augusto. **Potential of floating photovoltaic plant in a tropical reservoir in brazil**. Journal Of Environmental Planning And Management. Brazil, p. 1-24. 19 fev. 2020.DOI: <https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1719824>

RODRIGUES, Pedro Sinval Ferreira *et al.* **Plataforma fotovoltaica flutuante de sobradinho (ba) - desafios e estratégias de implantação**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 8., 2020, Fortaleza. **Artigo**. 2020. p. 1-11. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/download/867/867>.. Acesso em: 25 mar. 2023.

SAUR NEWS BUREAU (Índia). **Here is how you can calculate the annual solar energy output of a photovoltaic system**. 2016. Disponível em: <https://www.saurenergy.com/solar-energy-blog/here-is-how-you-can-calculate-the-annual-solar-energy-output-of-a-photovoltaic-system>. Acesso em: 21 abr. 2023.

SIMONE, Gilio Aluisio. **Transformadores: teoria e exercícios**. São Paulo: Érica Ltda, 2012. 312 p.

SOLAR PLAZA. **“Floating Solar Conference, 2019”**. Disponível em <https://www.floatingsolarconference.com/news-source/2019/08/23/floating-solar-mythbusting>. Acesso em: 05.Maio.2023

YAHYAUI, Imene. **Advances in Renewable Energies and Power Technologies**: solar and wind energies. Madrid: Elsevier, 2018. 1 v.

YOUSUF, Hasnain; KHOKHAR, Muhammad Quddamah; ZAHID, Muhammad Aleem; KIM, Jaeun; KIM, Youngkuk; CHO, Eun-Chel; CHO, Young Hyun; YI, Junsin. A Review on Floating Photovoltaic Technology (FPVT). **Current Photovoltaic Research**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 67-78, 30 set. 2020. 한국태양광발전학회. <http://dx.doi.org/10.21218/CPR.2020.8.3.067>.

Disponível em: <https://koreascience.kr/article/JAKO202028851206913.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ZAPAROLLI, Domingos. Usinas solares flutuantes. **Pesquisa Fapesp**, São Paulo, v. 324, n. 1, p. 62-66, fev. 2023. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2023/02/062-066_usinas-flutuantes_324.pdf. Acesso em: 02 maio 2023.

ZILLES, Roberto *et al.* **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 248 p.