



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**ESTUDO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA
FLUTUANTE EM UM LAGO DE HIDRELÉTRICA –
UHE TUCURUÍ**

**Autor: Adriano Cyrino de Sousa
Orientador: Dr. Augusto César de Mendonça Brasil**

**Brasília, DF
2017**



Adriano Cyrino de Sousa

**ESTUDO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA FLUTUANTE EM UM LAGO
DE HIDRELÉTRICA – UHE TUCURUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Augusto César de Mendonça Brasil

**Brasília, DF
2017**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Sousa, Adriano Cyrino de.

Estudo de uma usina solar fotovoltaica flutuante em um lago de hidrelétrica – UHE Tucuruí / Adriano Cyrino de Sousa. Brasília: UnB, 2017. 56 p. : il. ; 29,5 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2017. Professor Dr. Augusto César de Mendonça Brasil.

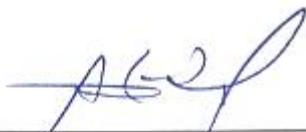
1. Energia solar fotovoltaica em lagos de hidrelétricas. 2. Usina solar sobre flutuadores. 3. Sistemas fotovoltaicos flutuantes. I. Brasil, Augusto César de Mendonça. II. Estudo da simulação da energia solar fotovoltaica em lagos de hidrelétricas.

CDU Classificação

**ESTUDO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA EM UM LAGO DE
HIDRELÉTRICA – UHE TUCURUÍ**

Adriano Cyrino de Sousa

Trabalho de Conclusão de Curso submetido como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 06/07/17 apresentado e aprovado pela banca examinadora abaixo assinada:



Prof. Dr.: Augusto César de Mendonça Brasil, UnB/ FGA

Orientador



Prof. Dr.: Jorge Andrés Cormane Angarita, UnB/ FGA

Membro Convidado



Prof. Dr.: Alex Reis, UnB/ FGA

Membro Convidado

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, por estar presente em todos os momentos e me apoiar em todas as decisões tomadas em minha vida.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, Dr. Augusto Brasil, que me apoiou ao longo de todo este trabalho.

Finalmente, agradeço a todos os meus amigos que estiveram presentes em meu cotidiano durante este período.

RESUMO

A proposta deste estudo é possibilitar um melhor entendimento a respeito da instalação de usinas solares fotovoltaicas em lagos de hidrelétricas, descrevendo os possíveis benefícios com sua utilização, além de seus potenciais impactos. Aborda-se neste trabalho uma análise na UHE Tucuruí, maior usina hidrelétrica do país em termos de potência fiscalizada, com 8.535 MW, e com uma imensa área de reservatório, no valor de 2.850 km². Pode-se instalar 1 MW no local com apenas 9660,6 m² de espelho d'água, representando uma ínfima parcela no corpo d'água em questão. A instalação deste tipo de empreendimento pode trazer um acréscimo de até 40% na capacidade instalada da usina, ocupando apenas 1,16% do reservatório, ou 33 km², sem acarretar novos investimentos em seu sistema elétrico. Com isso, seria possível inserir 3.414 MW de potência ao SIN.. Para que isso ocorra, é necessário um estudo acerca do sistema de flutuação a ser utilizado. Recomenda-se a adoção de um sistema de flutuação do tipo pontão, de conexão modular, para que o sistema seja flexível e não sofra danos físicos com a movimentação da água do corpo d'água em questão. Ademais, utiliza-se uma âncora do tipo pirâmide ou cogumelo, a depender da dimensão da usina a ser projetada, garantindo assim uma melhor fixação no fundo do reservatório, e uma estabilidade do complexo.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica em lagos de hidrelétricas; Usina solar fotovoltaica sobre flutuadores; Sistemas fotovoltaicos flutuantes.

ABSTRACT

The proposal of this study is to provide a better understanding of the implementation of photovoltaic solar power plants in hydroelectric lakes, describing the possible benefits of their use, as well as their potential impacts. In this work, an analysis is carried out at UHE Tucuruí, the largest hydroelectric power plant in the country in terms of controlled power, with 8,535 MW, and with an immense reservoir area, in the amount of 2,850 km². One can install 1 MW in the place with only 9660.6 m² of water mirror, representing a tiny part in the body of water in question. The installation of this type of project can bring an increase of up to 40% in the installed capacity of the plant, occupying only 1.16% of the reservoir, or 33 km², without entailing new investments in its electrical system. With this, it would be possible to insert 3,414 MW of power to the SIN. For this to happen, a study is needed about the flotation system to be used. It is recommended to adopt a pontoon-type flotation system, modular connection, so that the system is flexible and does not suffer physical damages with the water movement of the water body in question. In addition, an anchor of the pyramid or mushroom type is used, depending on the size of the plant to be designed, thus ensuring a better fixation at the bottom of the reservoir, and a stability of the complex.

Keywords: Photovoltaic solar energy in dam's reservoirs; floating photovoltaic energy; floating solar systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Capacidade fotovoltaica global entre 2004 e 2015 (Fonte: REN21, 2016).	13
Figura 2 - Sistema fotovoltaico flutuante no reservatório da usina hidrelétrica de Hapcheon (Fonte: K-WATER, 2012).	16
Figura 3 - Sistema fotovoltaico flutuante no Japão (Fonte: CIEL ET TERRE, 2017).	17
Figura 4 - Sistema fotovoltaico flutuante em construção no Reino Unido (Fonte: THAMES WATER, 2016).	18
Figura 5 - Projetos realizados pelo MME nas UHE Balbina e Sobradinho (Fonte: SUNLUTION, 2017).	19
Figura 6 – Sistema fotovoltaico flutuante instalado em Rosana, São Paulo (Fonte: BLUE SOL, 2016).	19
Figura 7 - Sistema fotovoltaico flutuante na Fazenda Figueiredo, em Goiás (Fonte: IRRIGO, 2017).	20
Figura 8 - Mapa de Irradiação Solar Brasileira (Fonte: TIBA et al., 2000).	22
Figura 9 – Composição de um módulo fotovoltaico utilizando silício cristalino (Fonte: PINHO; GALDINO, 2014).	24
Figura 10 – Curva característica I-V e curva de potência P-V para uma placa de potência nominal de 100W (Fonte: PINHO; GALDINO, 2014).	26
Figura 11 – Disposição ideal de um módulo fotovoltaico (Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012).	27
Figura 12 – Disposição ideal de usinas fotovoltaicas (Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012).	28
Figura 13 - Exemplo de VLFS (Fonte: WATANABE et al., 2004 - Adaptado).	31
Figura 14 - Descrição de flutuadores com a tecnologia Hydrelío ©, da marca Ciel et Terre (Fonte: CIEL ET TERRE BRASIL, 2015).	31
Figura 15 - Sistema de flutuação criado pela empresa Thompson Technology Industries (Fonte: TRAPANI, 2014).	32
Figura 16 - Tipos básicos de âncoras – Esquerda superior: Pirâmide; Direita superior: Cogumelo; Esquerda inferior: hélice; Direita inferior: à inércia (Fonte: MUSSON, 2015).	33
Figura 17 – Interface do programa RadiaSol 2 (Fonte: RadiaSol 2, 2017).	34
Figura 18 – Gráfico de barras da irradiação mensal média diária do programa RadiaSol 2 (Fonte: RadiaSol 2, 2017).	35
Figura 19 – Declinação magnética e norte magnético obtido na NOAA (Fonte: NOAA, 2017).	36
Figura 20 - Mapa de integração eletroenergética brasileira (Fonte: ONS, 2014).	41
Figura 21 - Visão aérea da barragem da UHE Tucuruí (Fonte: Google Earth, 2017).	42
Figura 22 - Norte magnética da UHE Tucuruí (Fonte: NOAA, 2017).	43
Figura 23 - Comparação entre os valores de irradiação solar média diária com 0° e com 10° de inclinação (Fonte: RadiaSol 2, 2017).	44
Figura 24 - Módulo fotovoltaico CS6K-270P-FG (Fonte: CANADIAN SOLAR, 2017).	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potência fiscalizada e área do reservatório das 10 maiores UHEs em operação do Brasil (Fonte: ANEEL, 2017).	14
Tabela 2 - Potenciais impactos ambientais provocados pela implementação de um sistema solar fotovoltaico flutuante.....	15
Tabela 3 - Alguns empreendimentos utilizando energia solar fotovoltaica flutuante em corpos d'água (Fonte: SHARMA, 2016).....	18
Tabela 4 – Escolha do ângulo de inclinação dos módulos (Fonte: BOSCH, 2013). ..	23
Tabela 5 – Eficiência típica de células fotovoltaicas (Fonte: TOLMASQUIM, 2016)..	23
Tabela 6 – Comparação de eficiências obtidas entre uma célula e um módulo fotovoltaico de uma determinada tecnologia (Fonte: FRAUNHOFER ISE, 2016).....	25
Tabela 7 - Características dos tipos de âncoras (Fonte: MUSSON, 2015).	33
Tabela 8 - Tabela de eficiência energética dos módulos fotovoltaicos (Fonte: INMETRO, 2017).	38
Tabela 9 - Ensaio realizados para verificação de conformidade de módulos fotovoltaicos.....	38
Tabela 10 - As 10 maiores UHEs do Brasil (Fonte: ANEEL, 2017).	40
Tabela 11 - Média mensal da irradiação solar diária média (kWh/m ² .dia) da Estação Tucuruí (Fonte: RadiaSol 2, 2017).....	43
Tabela 12 - Características do módulo CS6K-270P-FG (Fonte: CANADIAN SOLAR, 2017).....	45
Tabela 13 - Característica do inversor SIW700 T137-22 (Fonte: GRUPO WEG, 2016).....	47
Tabela 14 – Síntese dos sistemas de flutuação analisados.....	48
Tabela 15 - Configurações propostas para composição da usina.	50
Tabela 16 - Tabela qualitativa comparando as quatro construções descritas de sistemas fotovoltaicos flutuantes.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Disseleneto de cobre-índio-gálio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HDPE	Polietileno de alta densidade
IGRF	Campo de Referência Geomagnética Internacional
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	Rastreador do Ponto de Máxima Potência
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
REN21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	Condições padronizadas de teste
SWERA	Avaliação do Recurso da Energia Solar e Eólica
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
VLFS	Estruturas flutuantes muito grandes
WMM	Modelo Magnético Mundial

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Distância entre bordas de fileiras vizinhas de módulos fotovoltaicos
d	Espaçamento entre as fileiras de módulos fotovoltaicos
I_{MP}	Corrente de máxima potência
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
I_{STC}	Corrente nas condições padronizadas de teste
L	Comprimento do módulo fotovoltaico
P_{MP}	Potência máxima
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
V_{MP}	Tensão de máxima potência
W_p	Watt-pico
x	Distância entre a borda do módulo e a sua haste de sustentação
z	Altura da inclinação do módulo fotovoltaico
α	Ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico
n_M	Eficiência do módulo fotovoltaico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. MOTIVAÇÕES	13
1.2. OBJETIVO	15
1.3. ESTADO DA ARTE.....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1. RECURSO SOLAR.....	21
2.1.1. Radiação Solar	21
2.1.2. Orientação ideal dos módulos.....	22
2.2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	23
2.2.1. Características elétricas de módulos	25
2.2.2. Conexões elétricas de módulos	26
2.3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	27
2.3.1. Altura da inclinação dos módulos	27
2.3.2. Espaçamento entre módulos	27
2.4. INVERSORES	28
2.4.1. Características elétricas dos inversores	29
2.5. SISTEMAS DE FLUTUAÇÃO	30
3. METODOLOGIA	34
3.1. RADIASOL 2.....	34
3.2. DECLINAÇÃO MAGNÉTICA – NOAA	35
3.3. ESCOLHA DOS MÓDULOS E INVERSORES	36
3.4. ESCOLHA DO SISTEMA DE FLUTUAÇÃO	39
4. ESTUDO DE CASO	40
4.1. IRRADIAÇÃO SOLAR DA USINA.....	42
4.2. ORIENTAÇÃO IDEAL DOS MÓDULOS	42
4.3. VELOCIDADE DOS VENTOS	44
4.4. DETERMINAÇÃO DA DIMENSÃO DA USINA	44
5. DIMENSIONAMENTO DA USINA	45
5.1. MÓDULO ESCOLHIDO	45
5.2. INVERSOR ESCOLHIDO	46
5.3. SISTEMAS DE FLUTUAÇÃO ANALISADOS	47
5.4. COMPOSIÇÃO DO SISTEMA	49
5.5. ESPAÇO UTILIZADO	49
5.6. CONFIGURAÇÃO FINAL DOS COMPONENTES DA USINA	50
6. CONCLUSÃO	53
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

Em virtude da vasta diversidade de recursos presentes em território nacional, observa-se na matriz energética brasileira uma notável participação de fontes renováveis, que representava 39,4% em 2014, e espera-se aumentá-la para 45,2% em 2024, de acordo com o último Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2024 (Empresa de Pesquisa Energética, 2015).

Ainda segundo o documento, publicado em 2016 pela EPE, o Sistema Interligado Nacional (SIN) expandirá em 55% no período abordado, o que representa um incremento de 73.569 MW. Deste valor, quase metade será constituído de fontes renováveis diversas às Usinas Hidrelétricas de Energia, como solar, eólica, termelétricas à biomassa e PCH.

A mudança do cenário energético do país pode ser visualizada ao analisar a presença hodierna e a projeção futura da energia solar fotovoltaica. O Banco de Informações de Geração mostra que há 44 empreendimentos em operação, totalizando 23,8 MW de potência fiscalizada. Quanto aos com construção iniciada ou prevista, espera-se 111 empreendimentos, o que acarretaria em um acréscimo de 2.980 MW, ou seja, 125 vezes o valor atual (ANEEL, 2017).

A tendência supracitada não é vista somente no Brasil, mas em diversos países no mundo. Os significativos investimentos em energia solar fotovoltaica têm reduzido o custo de instalação desse tipo de sistema, o que por sua vez resulta em uma contínua expansão do setor. O gráfico abaixo quantifica esse crescimento, mostrando um avanço anual na capacidade instalada de 45,4% entre os anos de 2004 e 2015.

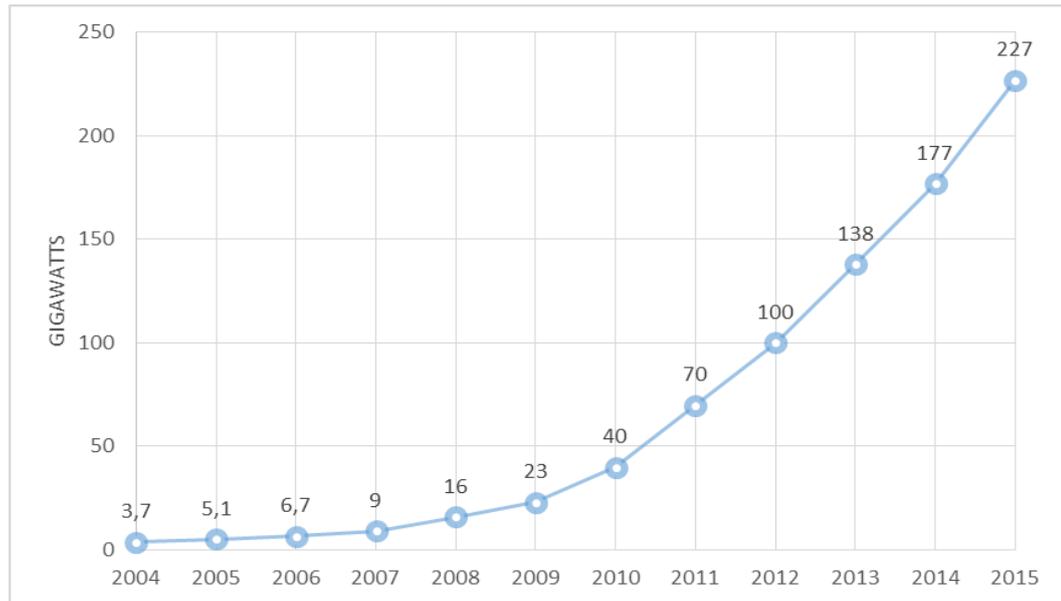


Figura 1 - Capacidade fotovoltaica global entre 2004 e 2015 (Fonte: REN21, 2016).

1.1. MOTIVAÇÕES

O recurso hídrico é responsável por 61,6% da capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil, sendo ao todo 1264 UHEs e PCHs conectadas ao sistema elétrico, distribuídas em todas as cinco regiões e em todas as oito bacias hidrográficas localizadas em território brasileiro (ANEEL, 2017).

Concomitantemente a isso, visualizam-se milhares de quilômetros de espelho d'água dos reservatórios. A UHE Tucuruí, segunda maior em termos de geração de energia elétrica do país, apresenta 2.850 km², área equivalente a 237.500 vezes a utilizada pela Usina de Tauá (estimada em 12.000 m²), situada em terra, no estado do Ceará, e com potência instalada de 1 MWp (BEIGELMAN, 2013).

A partir da relação mostrada acima, nota-se um enorme potencial energético ao transformarmos uma usina hidrelétrica em um sistema híbrido, adicionando um parque solar fotovoltaico flutuante em seu lago, o que permite um aumento de até 40% da potência instalada sem a necessidade de novos investimentos em subestação e linhas de transmissão conectadas ao SIN (GALDINO; OLIVIERI, 2017).

A análise do cenário hidroenergético do país permite a obtenção de um dado ainda mais significativo para mostrar o potencial energético da tecnologia. Observando a área do reservatório das 10 maiores UHEs em operação em termos

de potência fiscalizada, responsáveis por 24% da geração de energia nacional, vê-se uma superfície de água de 7.887 km². Adotando como fator limitante para o incremento da nova fonte geradora o percentual de 40% da potência fiscalizada de cada UHE, conclui-se que o acréscimo gerado seria de 9,7% da capacidade instalada no país, equivalente a 14.696 MW.

Tabela 1 - Potência fiscalizada e área do reservatório das 10 maiores UHEs em operação do Brasil (Fonte: ANEEL, 2017).

UHE	Potência Fiscalizada (MW)	Área do reservatório (km ²)
Tucuruí	8.535	2.850
Itaipu	7.000	1.350
Ilha Solteira	3.444	1.195
Jirau	3.375	362
Xingó	3.162	60
Santo Antônio	3.151	421
Paulo Afonso	2.462	13
Itumbiara	2.081	778
Teles Pires	1.820	136
São Simão	1.710	722
TOTAL	36.740	7.887

A expansão da tecnologia emergente em países como Índia, Japão e Coreia do Sul tem sido impulsionada principalmente pela baixa disponibilidade de terras, tornando assim o emprego de superfícies de corpos d'água uma solução interessante (MISTRY et al., 2017). Em outros países, justifica-se sua aplicação pelo aproveitamento do sistema elétrico construído para usinas hidrelétricas, como é o caso do Brasil, que possui sua energia gerada proveniente principalmente de hidroeletricidade.

Além dos benefícios supracitados, há também outros relacionados, como: redução da evaporação da água, relacionada com a área sombreada, o clima e a velocidade do vento os quais o sistema está submetido; praticidade de limpeza dos módulos fotovoltaicos; aumento da eficiência dos equipamentos, pois trabalham sob menor temperatura; dentre outros (MISTRY et al., 2017).

É importante ressaltar de que as vantagens citadas no parágrafo acima oferecidas pela implementação de uma usina solar fotovoltaica flutuante são relativas, uma vez que podem ser de grande influência ao sistema ou não, dependendo do local e de sua respectiva aplicação e magnitude.

Deve-se também considerar alguns potenciais impactos ambientais advindos da instalação de um sistema solar fotovoltaico flutuante no reservatório de uma UHE. Arelado a isso, pode-se estabelecer certas medidas mitigadoras, a fim de minimizá-los, como é visto na Tab. (2) mostrada abaixo.

Tabela 2 - Potenciais impactos ambientais provocados pela utilização de um sistema solar fotovoltaico flutuante.

Potencial impacto ambiental	Medidas mitigadoras
Influência na fauna e na flora presentes, ocasionada por um sombreamento constante de uma fração da área do lago.	Elaborar um sistema de amarração móvel, para que uma mesma área nunca seja sombreada e diretamente afetada pela temperatura do sistema de
Influência da temperatura do sistema flutuante na parcela da superfície do lago onde se encontra instalado.	forma definitiva; e estabelecer um limite de ocupação por módulos da superfície do lago.

Com o intuito de quantificar cada fator em diferentes regiões do país, projetos-pilotos estão sendo executados atualmente no Brasil, nas UHE Balbina (Amazonas) e Sobradinho (Bahia), ambos financiados pelo Governo Federal, com um aporte de cerca de R\$100 milhões, e realizados pela Eletronorte e Chesf (EBC, 2016).

1.2. OBJETIVO

A finalidade deste trabalho é reunir a base teórica necessária para uma melhor compreensão do tema em questão: a implementação de usinas solares fotovoltaicas sobre os lagos de reservatórios de hidrelétricas, aumentando a diversidade energética do país. Ainda pouco difundida no cenário nacional, o investimento nessa forma de geração de energia pode trazer diversos benefícios, como um melhor aproveitamento de sistemas elétricos subutilizados.

Baseado nisso, realiza-se o dimensionamento de uma usina solar fotovoltaica flutuante no reservatório da Usina Hidrelétrica de Energia Tucuruí, localizada no estado do Pará. Observando outros projetos semelhantes realizados no país e em outros países do Mundo, como Coreia do Sul e Índia, abordam-se aspectos ambientais e técnicos relacionados ao tema.

O presente estudo analisará principalmente aspectos diferenciais entre uma usina solar fotovoltaica comum e uma flutuante, mostrando análises comparativas de equipamentos para flutuação e métodos de sistemas de amarração disponíveis.

Todavia, não é objetivo do presente estudo realizar uma instalação in loco do sistema descrito. Ademais, a realização de experimentos para comprovar a influência de alguns fatores no local não será feita.

1.3. ESTADO DA ARTE

O aproveitamento de superfícies de corpos d'água para instalação de sistemas solares fotovoltaicos tem sido observado desde 2007. Desde então, países como Índia, Coreia do Sul, Estados Unidos, Japão, Reino Unido e França adotam a tecnologia como forma de préstimo de uma área anteriormente ociosa.



Figura 2 - Sistema fotovoltaico flutuante no reservatório da usina hidrelétrica de Hapcheon (Fonte: K-WATER, 2012).

Na Coreia do Sul, a K-Water (agência governamental responsável pelos recursos aquáticos do país) instalou, entre os anos de 2009 e 2013, três sistemas com essa tecnologia, com o propósito de analisar o comportamento e a viabilidade de tal. Com as prerrogativas de não agredir o meio ambiente, aumentar a eficiência do sistema solar e realizar o controle de algas no ecossistema, a agência apresentou ao mundo a tecnologia aplicada a reservatórios de hidrelétricas.

O primeiro, concluído em 2009, apresenta uma potência instalada de 2,4 kW, para uma análise inicial. Posteriormente, instalou-se em 2011 um sistema de 100 KW e um custo estabelecido em U\$6.400/kW, mostrando uma inviabilidade financeira do projeto ao custar o dobro de um sistema fixado em terra. Finalmente, construiu-se um sistema de 500 kW com um investimento de U\$4.350/kW, mostrando-se ainda superior a um sistema convencional, porém com considerável redução ao compará-lo com o segundo projeto do órgão (DONG-HWAN, 2015).

Em outros países a tecnologia já vem sendo explorada es escalas mais significativas. A empresa francesa Ciel et Terre, por exemplo, já realizou 35 projetos nesse contexto em diversos países, como Estados Unidos, Japão, Coreia do Sul, Malásia, Tailândia e outros na Europa (CIEL ET TERRE, 2017).

A figura abaixo mostra um dos empreendimentos mais relevantes em termos de potência da empresa supracitada, localizado próximo à Takaoka, no Japão. A usina em questão utiliza uma área de lago de 31.300 m²e apresenta uma potência nominal de 2,87 MWp.



Figura 3 - Sistema fotovoltaico flutuante no Japão (Fonte: CIEL ET TERRE, 2017).

Além da empresa francesa mencionada, outras empresas têm investido na utilização da tecnologia, como se pode observar no empreendimento da empresa britânica Thames Water. Em parceria com a Ennoviga Solar e Lightsource Renewable Energy, está em construção no Reservatório Queen Elizabeth II o maior sistema solar flutuante da Europa, que irá gerar 6,3 MWp, com 23.000 módulos.



Figura 4 - Sistema fotovoltaico flutuante em construção no Reino Unido (Fonte: THAMES WATER, 2016).

Tabela 3 - Alguns empreendimentos utilizando energia solar fotovoltaica flutuante em corpos d'água (Fonte: SHARMA, 2016).

Localização	Potência Instalada (kW)
Rajarhat, Índia	10
Kerala, Índia	10
Hyogo, Japão	2.300
Rengeji, Japão	300
Yasugi, Japão	1.098
Berkshire, Reino Unido	200
Kenwood (Kunde Winery), EUA	10

No Brasil, os dois projetos-pilotos em Balbina e Sobradinho indicam uma geração de 1 MWp a partir de agosto de 2016, além de um acréscimo de 4 MWp em cada usina em outubro de 2017. O projeto, realizado pela Eletronorte e Chesf com

apoio de empresas do ramo de energia, como Sunlution e WEG, está previsto para ser concluído em janeiro de 2019.



Figura 5 - Projetos realizados pelo MME nas UHE Balbina e Sobradinho (Fonte: SUNLUTION, 2017).

Existe também um projeto presente na cidade de Rosana, no estado de São Paulo, que consiste em um sistema solar fotovoltaico instalado em terra, de potência instalada de 250 KW e outro flutuante, sobre o reservatório da UHE Porto Primavera, de 25 kW.



Figura 6 – Sistema fotovoltaico flutuante instalado em Rosana, São Paulo (Fonte: BLUE SOL, 2016).

Além dos projetos supracitados, pode-se também citar o empreendimento realizado em Cristalina, no estado de Goiás, pela empresa MTEC Energia. Instalado sobre um reservatório artificial na Fazenda Figueiredo, o sistema apresenta 1150 módulos de 265 W cada, totalizando 305 kWp conectados à rede elétrica.



Figura 7 - Sistema fotovoltaico flutuante na Fazenda Figueiredo, em Goiás (Fonte: IRRIGO, 2017).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção aborda os principais conceitos e embasamentos teóricos no que concerne o tema em questão. A partir disso, será possível compreender toda a metodologia descrita posteriormente, bem como os dados presentes no estudo de caso.

2.1. RECURSO SOLAR

2.1.1. Radiação Solar

A radiação solar (ou irradiação solar) é o nome dado à energia emitida pelo sol que incide sobre a superfície terrestre. Esse fenômeno meteorológico corresponde à soma de duas componentes principais – a direta e a difusa – em um plano horizontal, resultando na Irradiação Solar Global. A parcela direta envolve os raios que atingem o solo diretamente, enquanto a irradiação difusa constitui a fração que se encontra dispersa no meio.

Somado a isso, considera-se que em um plano inclinado deve-se levar em conta uma nova fração, chamada de albedo. Esta terceira parcela é resultado da reflexão do ambiente ao redor, contribuindo de forma ínfima ao valor global.

Essa grandeza pode apresentar um alto grau de variabilidade, uma vez que seu valor depende de múltiplos fatores, tais como as estações do ano, período do dia e condições meteorológicas.

O Atlas Solarimétrico do Brasil, presente na Fig. (4), disponibiliza o Mapa de Irradiação Solar do país. Por meio de isolinhas, ele divide o mapa de acordo com a intensidade da grandeza, que pode variar em território nacional de 14 a 20 MJ/m².dia, como mostrado abaixo.

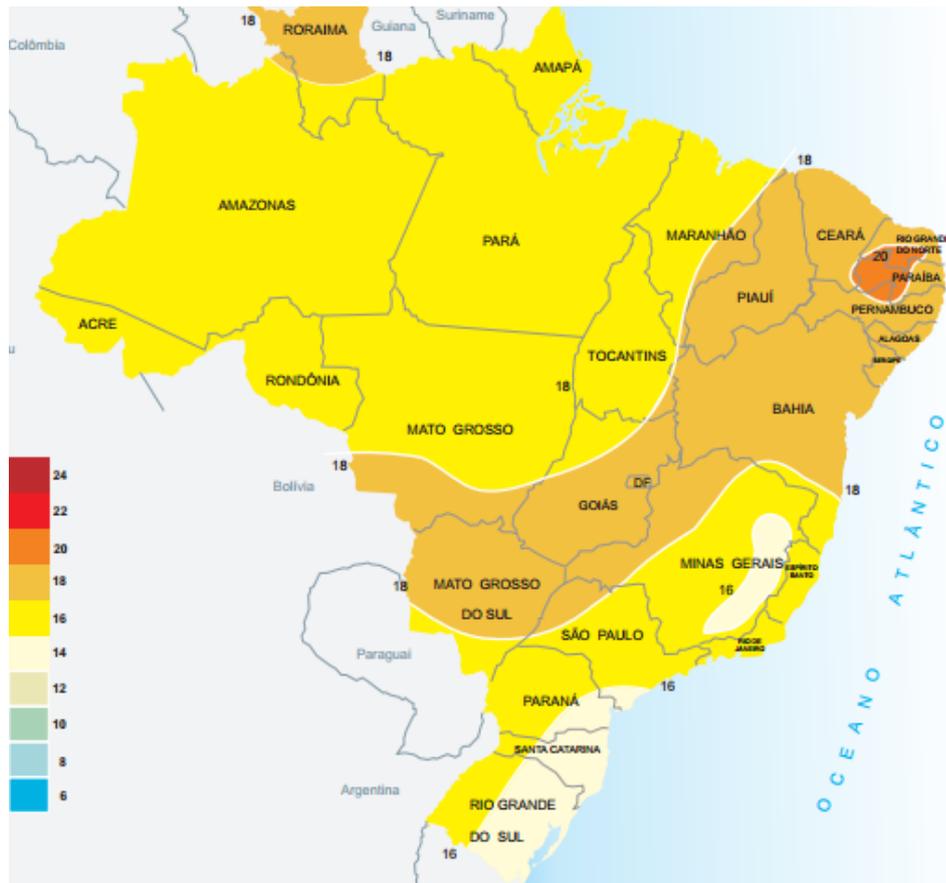


Figura 8 - Mapa de Irradiação Solar Brasileira (Fonte: TIBA et al., 2000).

2.1.2. Orientação ideal dos módulos

Visando aperfeiçoar a eficiência de um sistema fotovoltaico, existem recomendações a respeito da orientação ideal a ser adotada em um projeto. Critérios como a determinação do norte magnético e a inclinação dos painéis em relação ao solo devem ser considerados durante o seu dimensionamento.

Em empreendimentos realizados no hemisfério sul da Terra, os painéis devem estar orientados em direção ao Norte Magnético. Para obtenção de seu valor, deve-se obter o ângulo de declinação magnética do local em estudo e a orientação do Norte Magnético.

Em relação ao ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos (α), esse deve ser calculado conforme mostrado na Tabela (4). Ainda sobre esse critério, é recomendado manter uma inclinação mínima de 10° para que o sistema não enfrente problemas relacionados à sujeira acumulada em seus painéis (PINHO; GALDINO, 2014).

Tabela 4 – Escolha do ângulo de inclinação dos módulos (Fonte: BOSCH, 2013).

Latitude geográfica	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
Acima de 41°	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

2.2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Um módulo fotovoltaico é uma associação de dezenas de células fotovoltaicas, comumente associadas em série, salvo raras aplicações. Sabe-se que cerca de 95% do mercado de energia solar utiliza o silício como matéria-prima na fabricação dessas células, por ser um semicondutor abundante no planeta.

Além disso, são encontradas células de silício cristalino em abundância. Isso ocorre devido às suas maiores eficiências apresentadas. Existem também outras tecnologias, envolvendo o material em sua forma amorfa ou cristalina em filmes finos, que apresentam uma menor eficiência e, por consequência, um menor uso comercial.

Há outros materiais utilizados na indústria, como o telureto de cádmio (CdTe) e o disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS), que são utilizados em células de filmes finos. Porém, seu emprego é limitado seja pela sua raridade, toxicidade ou ainda menor eficiência ao compará-los com o silício cristalino.

Tabela 5 – Eficiência típica de células fotovoltaicas (Fonte: TOLMASQUIM, 2016).

Tecnologia	Material da célula fotovoltaica	Eficiência típica dos módulos comerciais
Silício cristalino	Silício monocristalino	17 a 21,5 %
	Silício policristalino	14 a 17 %
	Silício amorfo	4 a 8 %
Filmes finos	Telureto de cádmio	10 a 16,3 %
	Disseleneto de cobre-índio-gálio	12 a 14,7 %
Concentrador fotovoltaico (CPV)		27 a 33 %

Finalmente, podem ser encontradas também tecnologias em desenvolvimento, como as células multijunção e a concentração fotovoltaica, que apresentam uma alta eficiência do dispositivo atrelada a um maior preço comercial, o que as tornam inviáveis para aplicação em larga escala.

Alguns fatores podem influenciar em seu desempenho, como a radiação solar incidente e a temperatura do sistema. Maiores irradiações resultam em um aumento linear da corrente elétrica, acarretando assim em uma maior potência ao sistema. Em contrapartida, uma maior temperatura da placa significa uma perda de tensão e também um decréscimo da potência.

É importante ressaltar que todas as características elétricas presentes nos relatórios dos fabricantes de módulos fotovoltaicos são obtidas em condições padronizadas de teste, o STC (em inglês, *Standard Test Conditions*). Tais condições consideram uma irradiância solar de 1000 W/m^2 a uma temperatura do sistema de 25°C , e são reproduzidas precisamente em laboratório, tornando difícil a sua representação na prática.

Na figura abaixo se observam os elementos que compõem um módulo fotovoltaico. O filme posterior tem função isolante no dispositivo. Já EVA significa acetato de etil vinila (do inglês *Ethylene-vinyl acetate*) e tem a finalidade de aumentar a sua durabilidade.

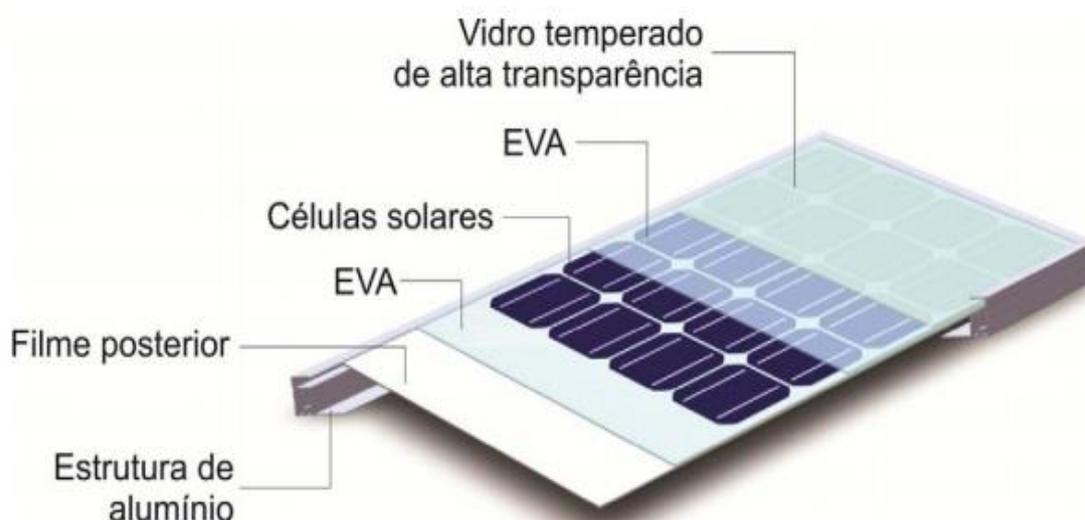


Figura 9 – Composição de um módulo fotovoltaico utilizando silício cristalino (Fonte: PINHO; GALDINO, 2014).

A agregação desses diversos componentes às células solares provoca uma considerável perda de sua eficiência mas são fundamentais para a comercialização da tecnologia.

A tabela seguinte compara a eficiência obtida em laboratório de uma determinada tecnologia adotada numa célula fotovoltaica. O primeiro elemento de comparação equivale a uma única célula, enquanto que o segundo representa um módulo fotovoltaico composto a partir da associação de dezenas delas. Ao associá-las, a eficiência do módulo atinge a um valor 10,5% menor do que a da célula unitária.

Tabela 6 – Comparação de eficiências obtidas entre uma célula e um módulo fotovoltaico de uma determinada tecnologia (Fonte: FRAUNHOFER ISE, 2016).

Eficiência de células e módulos em silício monocristalino	
Célula fotovoltaica	25,6 %
Módulo fotovoltaico	22,9 %

2.2.1. Características elétricas de módulos

Os módulos fotovoltaicos possuem algumas características fundamentais para o dimensionamento de um sistema, que são mostradas a seguir. Vale ressaltar que, em fichas técnicas, sempre serão adotados valores em STC.

- Tensão de circuito aberto (V_{OC}): maior tensão encontrada no módulo, quando não há corrente no circuito;
- Corrente de curto-circuito (I_{SC}): maior corrente encontrada no módulo, quando seus terminais encontram-se curto-circuitados;
- Potência máxima (P_{MP}): máxima potência fornecida pelo módulo, expressada junto à unidade W_p ;
- Tensão de máxima potência (V_{MP}): tensão medida em seus terminais quando opera à máxima potência;
- Corrente de máxima potência (I_{MP}): corrente elétrica medida em seus terminais quando opera à máxima potência;
- Eficiência do módulo (η_M): rendimento obtido pela placa considerando sua operação em potência máxima e a área do produto às condições padronizadas de teste.

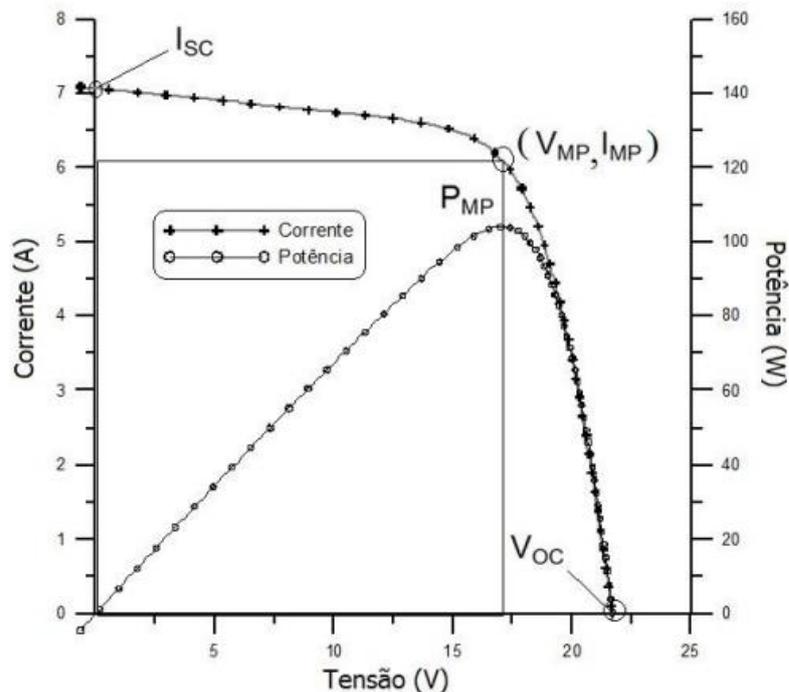


Figura 10 – Curva característica I-V e curva de potência P-V para uma placa de potência nominal de 100W (Fonte: PINHO; GALDINO, 2014).

2.2.2. Conexões elétricas de módulos

A caixa de junção fica localizada na parte posterior de módulos fotovoltaicos, e apresenta em seu interior as conexões dos circuitos das células e os diodos de desvio, que visam uma maior proteção do sistema e uma minimização de perdas de potência. Na parte externa há dois conectores que conectam a caixa de junção aos cabos elétricos do painel.

Os cabos elétricos garantem o acesso do módulo fotovoltaico à eletricidade. São construídos com características elétricas, térmicas e mecânicas especiais, proporcionando uma operação adequada para esta aplicação mesmo a condições severas como, por exemplo, no caso da radiação solar excessiva.

Já a conexão de módulos fotovoltaicos é realizada por meio de equipamentos chamados conectores, e podem ser feitas em série – ao conectar o terminal negativo de um módulo ao terminal positivo de outro – ou em paralelo – por meio de *strings boxes*. A tecnologia adotada como padrão mundial do mercado é a MC4, por agregar uma maior segurança através de um eficiente sistema de travamento, que possibilita a interrupção da conexão por meio de o pressionamento de uma trava.

Os strings boxes (ou caixa de *strings*) organizam a conexão de strings em paralelos, oferecendo uma proteção ao sistema com a presença de fusíveis conectados em série, além de conter diodos de bloqueio, que impedem a circulação da corrente em sentido contrário ao original e impedindo a danificação dos módulos fotovoltaicos.

2.3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

2.3.1. Altura da inclinação dos módulos

A altura da inclinação dos painéis (z) pode ser obtida através de uma simples relação entre o ângulo de inclinação dos módulos (α) e o comprimento de um único módulo (L). Neste estudo, será considerada a utilização da haste suportando uma das extremidades da placa, como visto na figura abaixo.

$$z = L \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

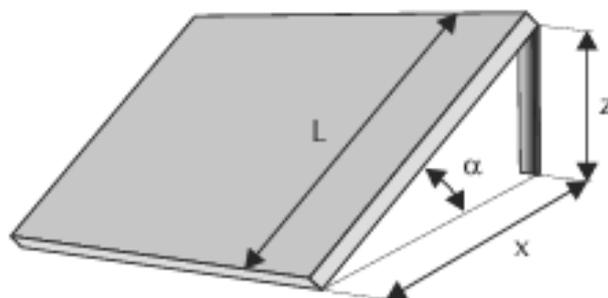


Figura 11 – Disposição ideal de um módulo fotovoltaico (Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012).

2.3.2. Espaçamento entre módulos

Em usinas fotovoltaicas, a disposição do sistema costuma ser feita em fileiras de painéis. Para realização de tal, é necessário preocupar-se com o espaçamento entre essas fileiras (d), uma vez que o efeito do sombreamento afeta diretamente a geração de energia em parques fotovoltaicos. Assim, obtém-se o espaçamento mínimo requisitado para não prejudicar o sistema, por meio de uma associação entre ele e a altura da inclinação.

$$d = 3,5 \cdot z \quad (2)$$

Outro fator importante a ser calculado é a distância entre as bordas de duas fileiras vizinhas (D), para facilitar o dimensionamento deste sistema. É possível obtê-lo através da Eq. (3), envolvendo apenas o espaço mínimo entre fileiras e a distância entre a borda e a haste de sustentação (x).

$$D = x + d \quad (3)$$

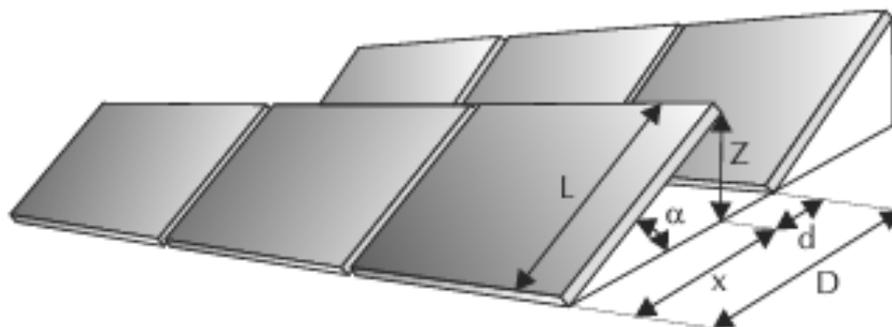


Figura 12 – Disposição ideal de usinas fotovoltaicas (Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012).

2.4. INVERSORES

O inversor é um dispositivo eletrônico de alto rendimento utilizado com o propósito de converter a corrente contínua recebida pela usina solar fotovoltaica em corrente alternada, permitindo assim o direcionamento da energia produzida pelo sistema à rede básica. Sabe-se da existência de diversos tipos de inversores no mercado, criados para as mais diversas aplicações.

Este componente do sistema fotovoltaico pode ser classificado de três formas: inversores centrais, *strings* e micro inversores. Os inversores centrais tem sua aplicação em maior escala, sendo largamente utilizados em projetos de parques geradores fotovoltaicos e, portanto, sendo o tipo mais viável ao estudo.

Os *strings* se restringem a um pequeno grupo de placas conectado a ele, sendo mais abordados em projetos residenciais e comerciais. Por fim, os micros inversores oferecem um maior nível de proteção ao sistema, por limitar a sua conexão a um único módulo, porém apresentam um maior custo e uma menor eficiência.

2.4.1. Características elétricas dos inversores

Algumas características devem ser observadas em um inversor fotovoltaico. O MPPT – Rastreamento do ponto de potência máxima (em inglês, *Maximum Power Point Tracking*), presente em todos os inversores conectados à rede elétrica, visando assegurar a utilização de uma máxima potência do dispositivo, quaisquer que sejam as condições de sua operação.

Na entrada de um inversor existem os seguintes parâmetros:

- Faixa útil de tensão: amplitude do valor da tensão de entrada no qual o inversor consegue aperfeiçoar sua operação a partir do sistema MPPT supracitado. Valores fora dessa faixa resultam em uma perda da eficiência do sistema;
- Tensão máxima: significa o maior valor de tensão aceito para operação do inversor. Não se recomenda, porém, adotá-la em projetos, como citado no tópico anterior;
- Corrente máxima: maior valor de corrente recomendada pelo fabricante.

Já na saída deste equipamento eletrônico, algumas características são fixas. No Brasil, por exemplo, a frequência de saída do produto é estabelecida em 60 Hz, para atender aos requisitos da rede básica. A tensão de saída depende da região do país em que é utilizado, podendo ser encontrado em 127 ou 220 V. Outros fatores são considerados em sua escolha, dentre eles:

- Potência nominal: apresenta o valor máximo possível a ser injetado na rede elétrica;
- Regulação de tensão: mostra a variação da tensão de saída permitida durante a operação;
- Rendimento na conversão de potência: versões modernas apresentam eficiência de, no mínimo, 90%. Analisando inversores do Grupo WEG, observa-se um valor padrão entre 97 e 99% (GRUPO WEG, 2016).

Enfim, atributos como a umidade relativa do ambiente, grau de proteção e temperatura de operação têm o intuito de limitar as condições do local de instalação deste importante componente.

2.5. SISTEMAS DE FLUTUAÇÃO

Em diversos países, como Japão, Índia e Coreia do Sul, onde há uma recorrente indisponibilidade de área útil para construção de determinados empreendimentos, têm sido implementados sistemas de flutuação sobre a lâmina d'água de rios, lagos, reservatórios de hidrelétricas e até em mar aberto. Por se tratar frequentemente de estruturas de grande porte, são comumente chamadas de VLFS (do inglês *Very Large Floating Structures*, que significa Estruturas Flutuantes Muito Grandes).

Os VLFS podem ser construídos para alocar aeroportos, pontes, quebra-mares, piers, locais de armazenamento, plantas de geração de energia, dentre outras aplicações possíveis.

Apesar de encontrarem-se alguns projetos com estruturas de concreto, a maioria é encontrada com estruturas de aço, uma vez que possui maior durabilidade, maior resistência mecânica, maior praticidade de manuseio e menor custo, por exemplo. Geralmente encontram-se também boias flutuadoras nesses projetos.

Esses sistemas podem ser separados em duas categorias: pontão e semissubmersível. A primeira é de instalação simplificada, uma vez que não possui fixação no fundo do corpo d'água. Já a segunda é utilizada em locais onde as ondas podem atingir valores elevados, requerendo assim que o sistema apresente uma fixação adicional, além da provida pelo sistema de amarração (ANDRIANOV, 2005).

Uma exemplificação do sistema do tipo pontão pode ser visto na figura abaixo. Indubitavelmente, um sistema de amarração deve ser incluído no projeto, a fim de limitar a movimentação do grupo. Adicionalmente, pode-se inserir uma ponte de acesso entre a terra e o flutuador, além de quebra-mares, que têm a finalidade de reduzir a intensidade das ondas na região.

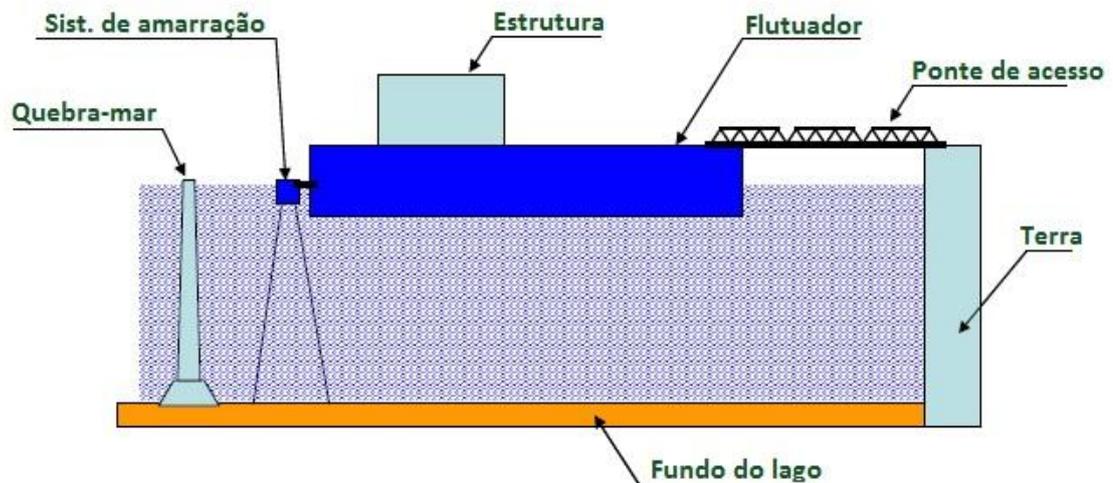


Figura 13 - Exemplo de VLFS (Fonte: WATANABE et al., 2004 - Adaptado).

Existem alguns fabricantes que desenvolveram suas tecnologias próprias de sistemas de flutuação especificamente para sistemas solares, como é o caso da Ciel et Terre. O equipamento, feito de HDPE (Polietileno de alta densidade), permite que painéis fotovoltaicos possam ser instalados sobre a água, sem comprometer a eficiência do sistema. É dividido em dois componentes: os flutuadores principais, onde se instalam os painéis; e os flutuadores secundários, que tem por finalidade fornecer apoio ao sistema no que diz respeito à manutenção e limpeza, além de garantir que haja um adequado espaçamento entre painéis.

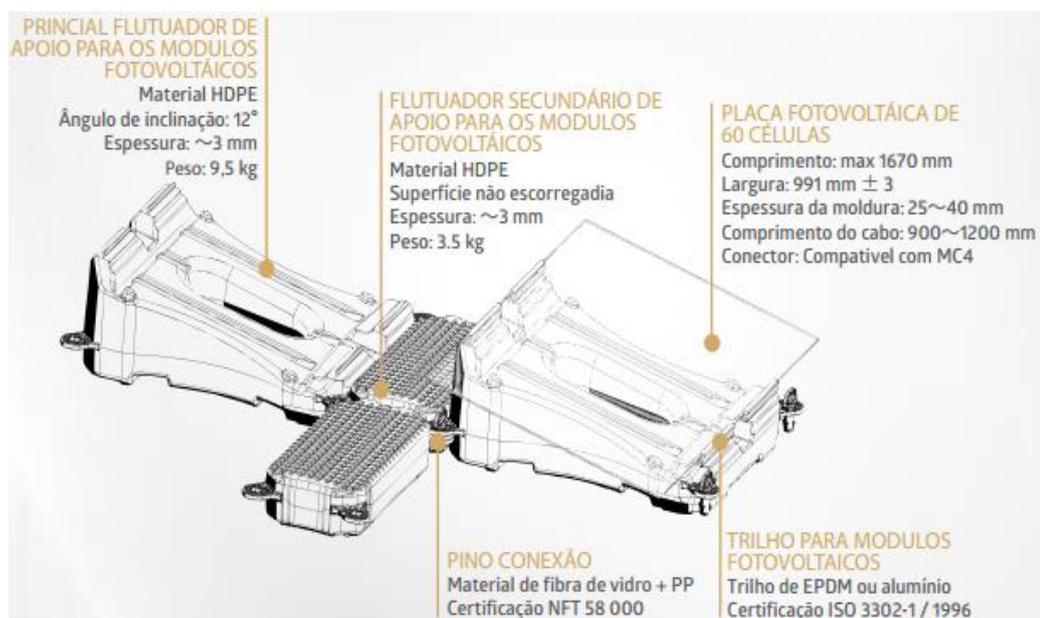


Figura 14 - Descrição de flutuadores com a tecnologia Hydrelío ©, da marca Ciel et Terre (Fonte: CIEL ET TERRE BRASIL, 2015).

Outro exemplo de fabricante com tecnologia de flutuação própria é a Infratech Industries, uma companhia australiana que adota um sistema de rastreamento solar no equipamento, além de implementar uma configuração de concentração da irradiação solar, ambos com a finalidade de aumentar a eficiência do empreendimento em até quase 60%, segundo a própria empresa (HARTZELL, 2016).

Por fim, pode-se citar também a Thompson Technology Industries, que criou o sistema Floatovoltaic, utilizado em um empreendimento no estado da Califórnia, nos Estados Unidos, adotando um sistema de estrutura semelhante ao da empresa Ciel et Terre, como observado na figura abaixo.

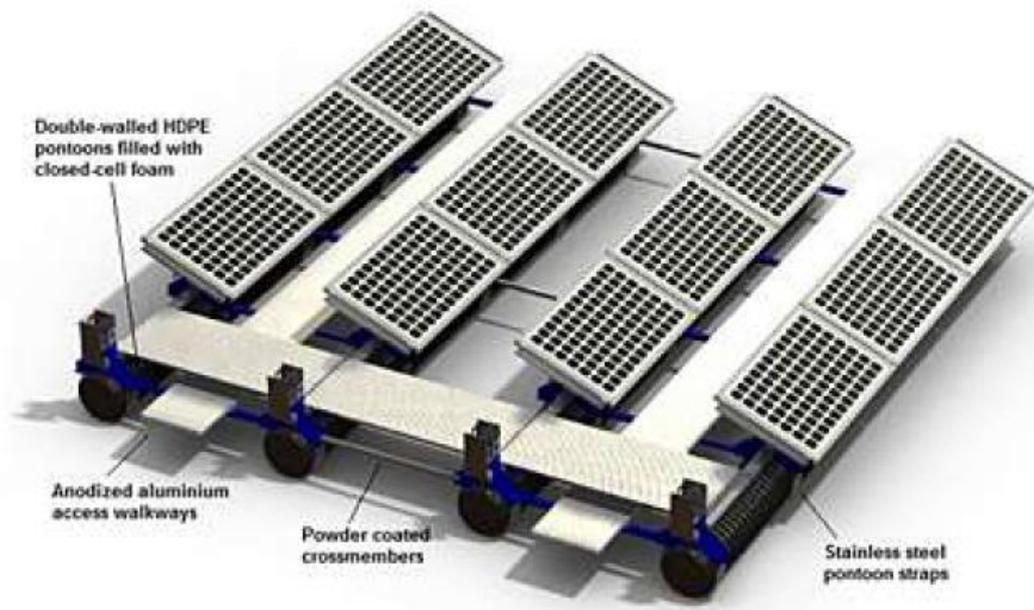


Figura 15 - Sistema de flutuação criado pela empresa Thompson Technology Industries (Fonte: TRAPANI, 2014).

Faz-se necessária a utilização de um sistema de amarração no projeto, a fim de garantir uma maior estabilidade à instalação. Composto essencialmente de âncora, cordas e correntes, podemos citar como principal benefício como a sua limitação à movimentação horizontal de um VLFS contra ventos e ondas (OHKUBO et al., 2000).



Figura 16 - Tipos básicos de âncoras – Esquerda superior: Pirâmide; Direita superior: Cogumelo; Esquerda inferior: hélice; Direita inferior: à inércia (Fonte: MUSSON, 2015).

Um componente de significativa importância para esse sistema é a âncora. De acordo com o Musson (2015), existem quatro tipos básicos: à inércia (*deadweight* em inglês), cogumelo, pirâmide e hélice. Todas as suas características, bem como vantagens e desvantagens estão descritas na tabela abaixo.

Tabela 7 - Características dos tipos de âncoras (Fonte: MUSSON, 2015).

Tipo	Força de fixação	Notas
À inércia	0,5 lbf/lb	<ul style="list-style-type: none"> - Recomendado para fundos rochosos - Design simples - Pesado e de difícil manuseio
Cogumelo	2,4 lbf/lb	<ul style="list-style-type: none"> - Recomendado para fundos lamacentos - Necessidade de instalação adequada
Pirâmide	10,0 lbf/lb	<ul style="list-style-type: none"> - Recomendado para fundos lamacentos - Alta taxa de força de fixação por peso - Design simples - Custo relativamente elevado
Hélice	10.000 lbf para uma âncora de 10 polegadas	<ul style="list-style-type: none"> - Recomendado para fundos fofos - Instalação complexa e manutenção periódica necessária

3. METODOLOGIA

3.1. RADIASOL 2

O software RadiaSol 2 foi criado pelo Laboratório de Energia Solar, situado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Esse programa utiliza em seu código modelos matemáticos presentes em literaturas do tema ou desenvolvidas por seus criadores. A partir disso, calcula-se como se dá a distribuição da radiação incidente no local em função de diversas condições. Posteriormente, são apresentados diversos gráficos e tabelas de todas as informações obtidas na análise de uma determinada região.

Ao visualizar a interface do software, é escolhida a região desejada e, subsequentemente, a cidade desejada, caso nessa não há estações meteorológicas com dados precisos do local, o RadiaSol 2 interpola valores das estações mais próximas e fornece uma estimativa do comportamento da localidade.

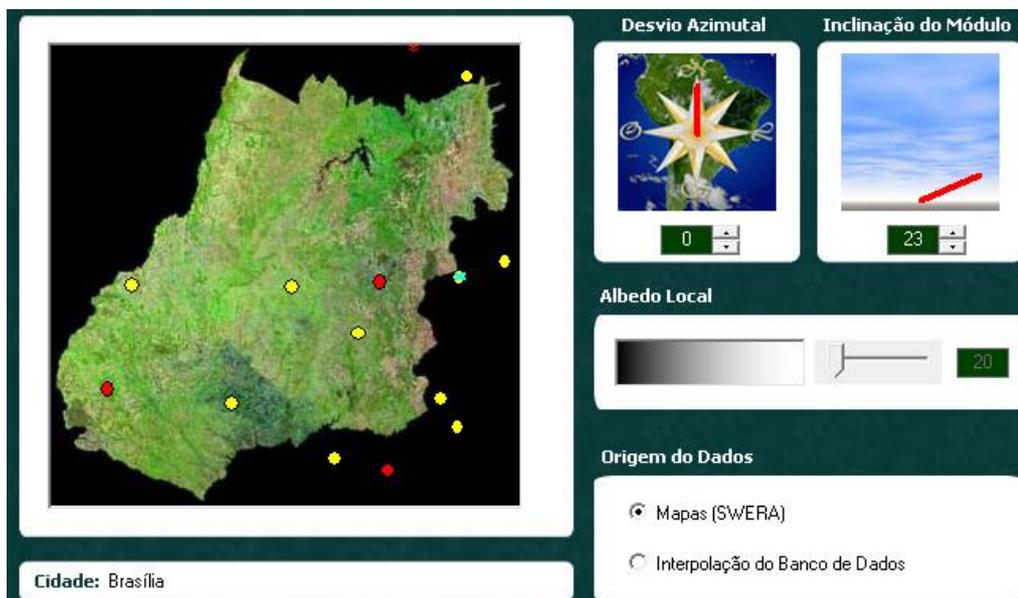


Figura 17 – Interface do programa RadiaSol 2 (Fonte: RadiaSol 2, 2017).

É válido lembrar que, como procedimento padrão, o programa utiliza a base de dados SWERA – Avaliação do Recurso da Energia Solar e Eólica (do inglês *Solar and Wind Energy Resource Assessment*). Essa iniciativa aglomera dados de diversos parceiros contribuintes, como NREL, NASA e INPE.

Após a seleção da cidade, são fornecidos dados elementares em valores médios mensais, tais como: temperatura (mínima e máxima), radiação (global e

inclinada) e umidade relativa. Além disso, sugere-se também o ângulo de inclinação ideal dos módulos fotovoltaicos para a cidade em análise. É possível acrescentar o norte magnético para agregação dos dados – este que será mostrado como obtê-lo na seção seguinte.

Finalmente, o software permite a visualização dos dados da região em formas de gráfico de barras, mostrando a irradiação solar média mensal em um dia, na unidade kWh/m².dia. Tanto seu valor em um plano horizontal, incluindo suas componentes direta e difusa, quanto o seu valor para o ângulo de inclinação inserido são mostrados.

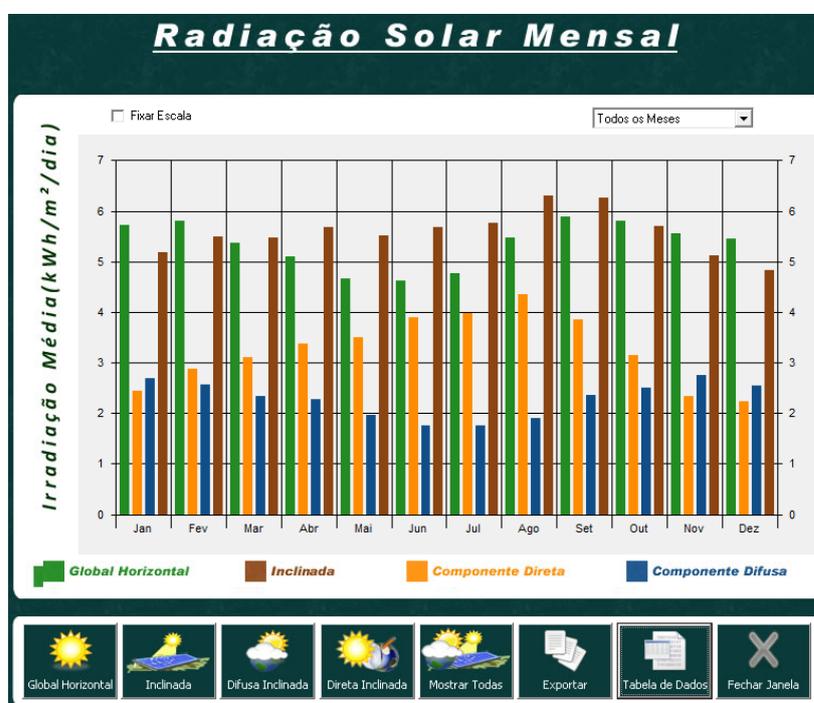


Figura 18 – Gráfico de barras da irradiação mensal média diária do programa RadiaSol 2 (Fonte: RadiaSol 2, 2017).

3.2. DECLINAÇÃO MAGNÉTICA – NOAA

O Departamento do Comércio dos Estados Unidos da América criou o órgão NOAA – Administração Nacional Oceânica e Atmosférica, que visa divulgar a análise e previsão de fenômenos climáticos, meteorológicos, oceânicos e da costa envolvidos com o país norte-americano.

Esse órgão possui uma ferramenta para obtenção do valor estimado da declinação magnética de uma determinada localidade, que por sua vez é calculado a partir de duas bases de dados possíveis: O Modelo Magnético Mundial (sigla WMM,

em inglês *World Magnetic Model*); e o Campo de Referência Geomagnética Internacional (IGRF, do inglês *International Geomagnetic Reference Field*). É sabido que ambas as bases de dados são pertencentes a órgãos do Governo dos Estados Unidos da América.

Ao fornecer as coordenadas geográficas do local, a base de dados pretendida, a data desejada e o formato do resultado, a ferramenta realiza o cálculo da grandeza e a fornece associada à incerteza de cálculo e a sua variação angular anual, como mostrado na figura abaixo. Adicionalmente, fornece-se também a posição do Norte Magnético do local em questão.

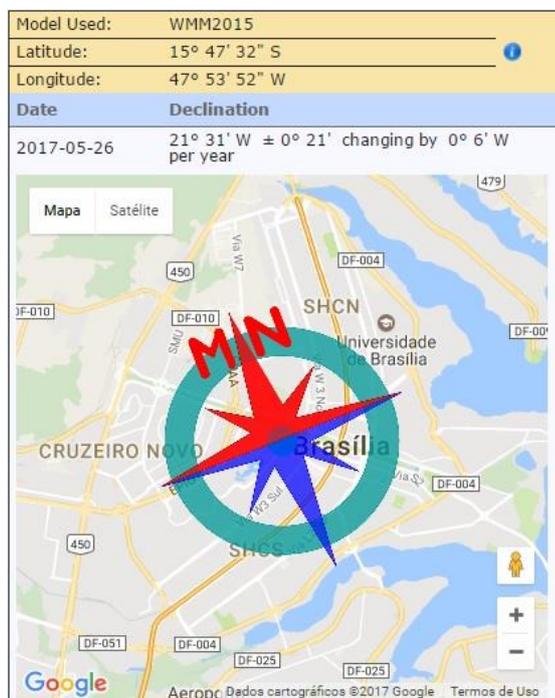


Figura 19 – Declinação magnética e norte magnético obtido na NOAA (Fonte: NOAA, 2017).

3.3. ESCOLHA DOS MÓDULOS E INVERSORES

Em um projeto de uma usina solar fotovoltaica, terrestre ou flutuante, a escolha de módulos e inversores deve ser justificada por pelo menos dois fatores relevantes, além do custo do produto: a disponibilidade do produto no mercado nacional; e a atestação da qualidade do produto frente a requisitos técnicos necessários para o seu bom funcionamento.

A disponibilidade de um produto no mercado brasileiro é fundamentada pela certificação do INMETRO, por meio da Portaria nº 004 de 4 de janeiro de 2011. O

documento possui a finalidade de estabelecer critérios para o Programa de Avaliação de Conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica para devida utilização da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), a fim de atender os requisitos do PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem (INMETRO, 2011).

Além de estabelecer alguns ensaios aos quais os equipamentos devem ser submetidos para emissão de etiqueta de conformidade do INMETRO, tal portaria também adota como necessária a presença de um representante de cada fabricante no país, de forma que esse possa ser responsável legal pela comercialização em território nacional.

A portaria supracitada engloba diversos equipamentos, como módulos fotovoltaicos, além de inversores conectados à rede de até 10 KW. Para inversores com potência nominal superior a esse valor, utiliza-se como referência a ABNT NBR 16149 (Sistemas fotovoltaicos – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição) e a ABNT NBR IEC 62116 (Procedimentos de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica), bem como certificados internacionais correspondentes (CEMIG, 2016).

Ademais, existem duas portarias que retificam e complementam certos pontos da Portaria nº 004/2011: a Portaria nº 357 de 1º de agosto de 2014; e a Portaria nº 017 de 14 de janeiro de 2016. Vale ressaltar que ambos os documentos não tem a finalidade de alterar os critérios de avaliação descritos inicialmente.

O INMETRO disponibiliza publicamente tabelas descritivas a respeito dos equipamentos que já foram certificados pelo órgão com o selo INMETRO. Acerca dos módulos, divide-se a sua classificação em categorias de A a E, de acordo com a sua eficiência. Atualizada em 26 de abril de 2017, na tabela constam 148 empresas, 516 marcas e 857 modelos, produzidos com silício cristalino ou camadas de filmes finos.

Apesar de os documentos mencionados na presente seção serem tomados como referência em âmbito nacional, recomenda-se que os módulos fotovoltaicos não sejam escolhidos apesar através dele, mas também observando todos os ensaios explicitados nas normas internacionais IEC 61215 (módulos em silício cristalino) e IEC 61646 (módulos em filmes finos). Isso se deve ao fato de que a

Portaria nº 004/2011 do INMETRO estabelecer somente alguns dos ensaios previstos nas normas internacionais citadas, não observando diversos outros aspectos.

Tabela 8 - Tabela de eficiência energética dos módulos fotovoltaicos (Fonte: INMETRO, 2017).

Classes	Índice do Módulo (%)	
	Silício Cristalino	Filmes Finos
A	EE > 13,5	EE > 9,5
B	13,5 >= EE > 13,0	9,5 >= EE > 7,5
C	13,0 >= EE > 12,0	7,5 >= EE > 6,5
D	12,0 >= EE > 11,0	6,5 >= EE > 5,5
E	EE < 11,0	EE < 5,5

Tabela 9 - Ensaio realizados para verificação de conformidade de módulos fotovoltaicos.

Ensaio realizado	INMETRO	IEC
Inspeção visual	x	x
Desempenho nas STC	x	x
Teste de isolamento	x	x
Medidas dos coeficientes de temperatura		x
Medidas na NOCT		x
Desempenho na NOCT		x
Desempenho em baixa irradiância		x
Teste de exposição ao ar livre		x
Resistência a ponto quente		x
Teste UV		x
Ciclo térmico		x
Umidade e congelamento		x
Umidade e aquecimento		x
Robustez dos conectores		x
Testes de torção		x
Resistência à carga mecânica		x
Resistência a granizo		x

3.4. ESCOLHA DO SISTEMA DE FLUTUAÇÃO

A escolha do sistema de flutuação é mais subjetiva àquela proposta para módulos e inversores, uma vez que não existem certificações específicas para o assunto. Sendo assim, alguns aspectos são considerados prioritários, tais como praticidade de manuseio, durabilidade e custo.

O sistema de amarração também é visto como um componente essencial do sistema de flutuação, pois garante a estabilidade e segurança ao complexo. Dessa forma, observar-se-á o tipo mais adequado para o local, bem como o tipo de âncora indicado.

4. ESTUDO DE CASO

O presente trabalho adotou como estudo de caso a Usina Hidrelétrica de Energia Tucuruí com o intuito de realizar o dimensionamento de uma usina solar fotovoltaica flutuante. A escolha deste empreendimento se justifica por apresentar uma considerável relevância na geração de energia elétrica, sendo a maior usina hidrelétrica em operação em termos de potência fiscalizada, responsável por 5,6% da capacidade de geração de energia elétrica do Brasil.

Tabela 10 - As 10 maiores UHEs do Brasil (Fonte: ANEEL, 2017).

Posição	Usina	Potência Fiscalizada (kW)
1 ^a	Tucuruí	8.535.000
2 ^a	Itaipu (Parte Brasileira)	7.000.000
3 ^a	Ilha Solteira	3.444.000
4 ^a	Jirau	3.375.000
5 ^a	Xingó	3.162.000
6 ^a	Santo Antônio	3.150.760
7 ^a	Paulo Afonso IV	2.462.400
8 ^a	Itumbiara	2.080.050
9 ^a	Teles Pires	1.819.800
10 ^a	São Simão	1.710.000

Além disso, a usina possui uma grande área de reservatório, com 2.850 km², o que indica uma grande disponibilidade de área para utilização de energia solar fotovoltaica. Por fim, há uma estação meteorológica presente no mesmo município, o que aumenta a precisão dos dados obtidos relativos à radiação solar.

A UHE Tucuruí pertence à bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia, e é conectada ao Sistema Interligado Nacional por meio de uma linha de transmissão de 500kV até Belém, capital do Estado do Pará. A figura abaixo ilustra esta conexão, visível graças ao Mapa de Integração Eletroenergética fornecido pelo ONS (2014).

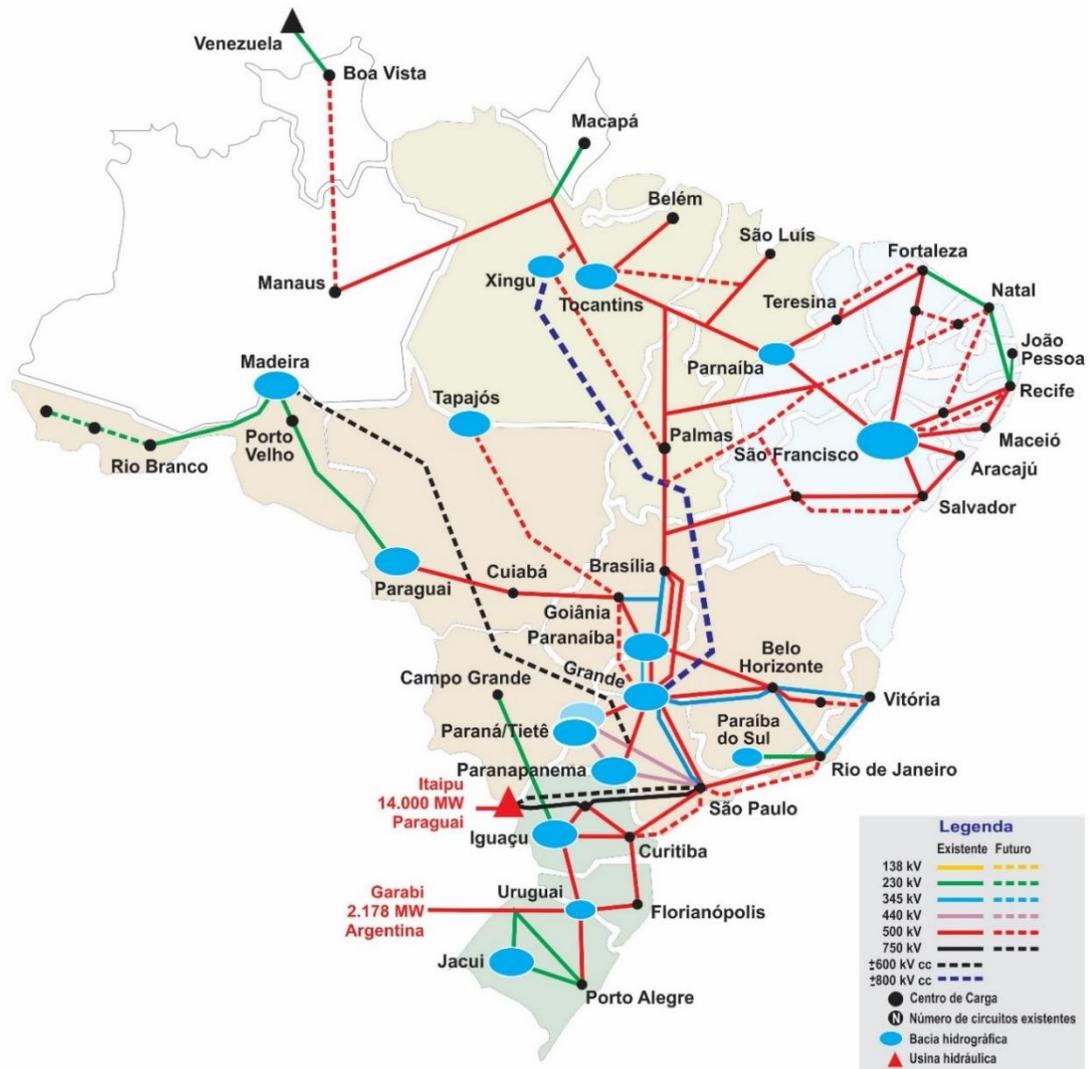


Figura 20 - Mapa de integração eletroenergética brasileira (Fonte: ONS, 2014).

Neste tópico encontram-se informações gerais bem como técnicas consideradas relevantes para o tema proposto, encontradas em seu site oficial.

- Data de início de operação: 30 de dezembro de 1984;
- Localização: Rio Tocantins, no município de Tucuruí (Pará);
- Coordenadas Geográficas: 03° 49' 59" S e 49° 38' 58" O;
- Potência instalada: 8.535 MW;
- Área do reservatório: 2.850 km²;



Figura 21 - Visão aérea da barragem da UHE Tucuruí (Fonte: Google Earth, 2017).

4.1. IRRADIAÇÃO SOLAR DA USINA

Expressando a média anual da radiação solar global diária brasileira, o Mapa Solarimétrico Brasileiro apresenta tal grandeza em MJ/m².dia, dividindo cada valor de intensidade por meio de isolinhas. Para os estados do Pará, localização da UHE Tucuruí, o valor encontrado foi de 16 MJ/m².dia, o que equivale a 4,44 kWh/m².dia.

Através do software RadiaSol 2, obtive valores mais aproximados pelos dados da Estação Tucuruí. A média anual da grandeza, por exemplo, é de 4,76 kWh/m².dia. Vale ressaltar que esse valor é válido para planos horizontais. Visando otimizar a irradiação incidente da região, o próximo tópico tratará sobre a orientação ideal dos painéis, a fim de absorver a maior intensidade possível de radiação.

4.2. ORIENTAÇÃO IDEAL DOS MÓDULOS

A partir da ferramenta de cálculo da declinação magnética de uma determinada coordenada geográfica, disponível no site do órgão americano NOAA, obteve-se o valor de 20,18° Oeste para a usina hidrelétrica em estudo.

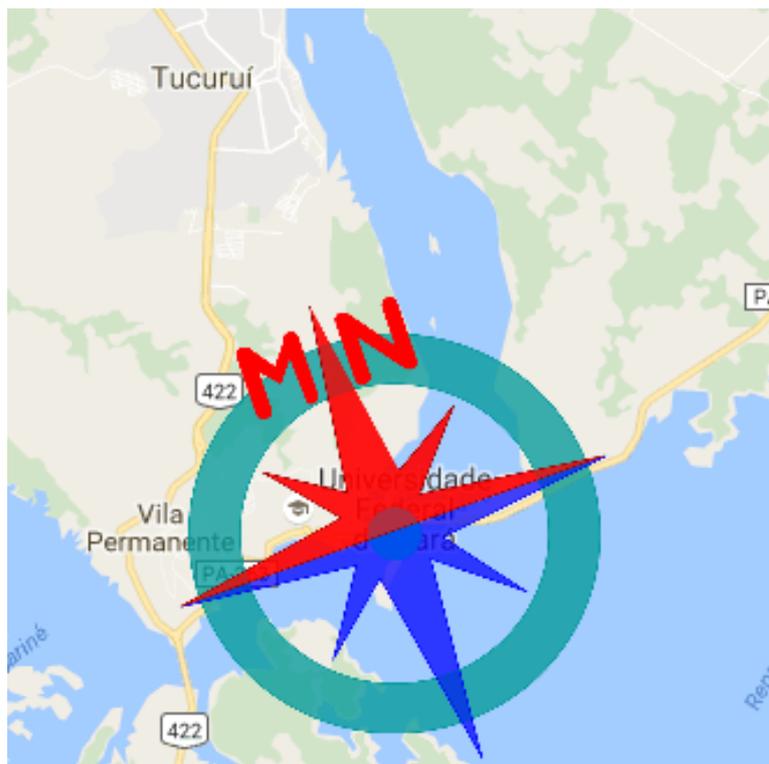


Figura 22 - Norte magnético da UHE Tucuruí (Fonte: NOAA, 2017).

Ao analisar dados da estação meteorológica mais próxima da UHE Tucuruí, a Estação Tucuruí, observa-se uma latitude correspondente a aproximadamente 4° . Logo, adota-se ao projeto um ângulo de inclinação de 10° , de acordo com a literatura previamente citada no trabalho.

Com essa sutil alteração no ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos, nota-se um aumento na média anual da irradiação solar de 1,42%, como se visualiza no gráfico abaixo. A seguir encontra-se também uma tabela mostrando as médias mensais de irradiação solar diária média.

Tabela 11 - Média mensal da irradiação solar diária média ($\text{kWh}/\text{m}^2.\text{dia}$) da Estação Tucuruí (Fonte: RadiaSol 2, 2017).

α	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0°	4,21	3,91	4,66	4,43	4,77	4,99	5,39	5,52	4,96	4,88	4,77	4,68
10°	4,00	3,81	4,68	4,60	5,08	5,41	5,81	5,79	5,05	4,79	4,57	4,39

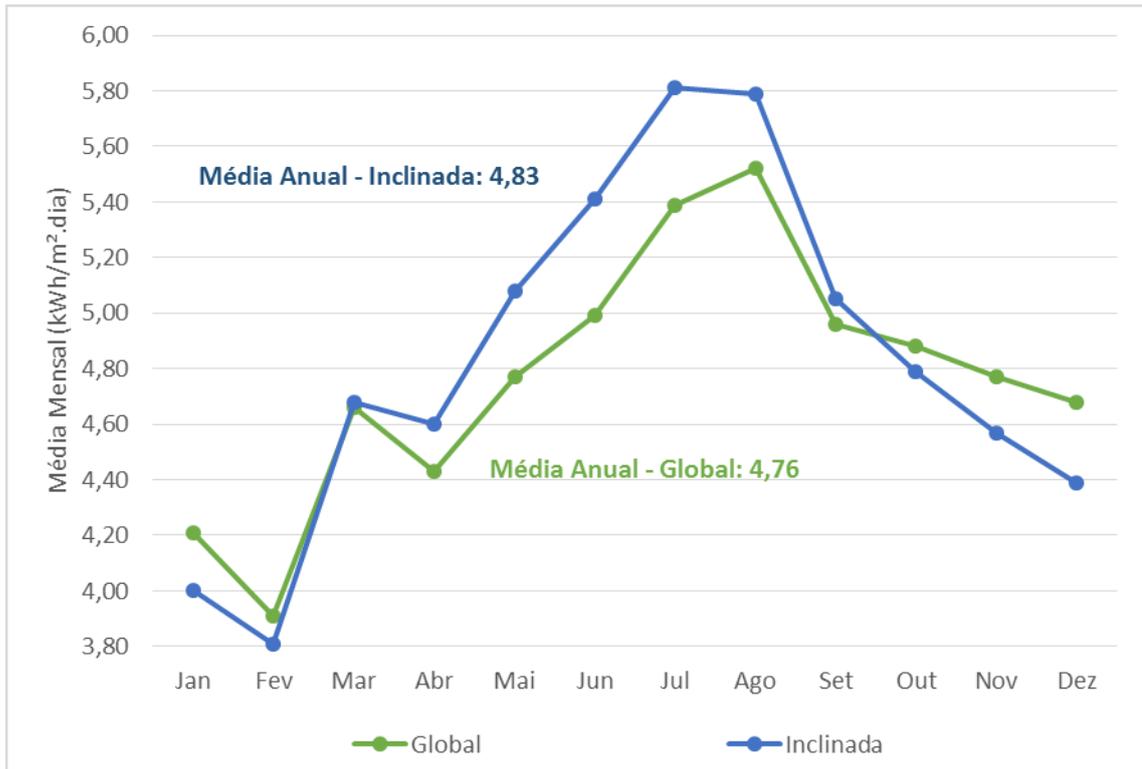


Figura 23 - Comparação entre os valores de irradiação solar média diária com 0° e com 10° de inclinação (Fonte: RadiaSol 2, 2017).

4.3. VELOCIDADE DOS VENTOS

De acordo com o INMET, Instituto Nacional de Meteorologia, a velocidade do vento na região é predominantemente abaixo de 3 m/s. Analisando o período de um ano, o maior valor encontrado de rajadas de vento foi de 18 m/s, mostrando ser uma região com baixas velocidades de vento.

4.4. DETERMINAÇÃO DA DIMENSÃO DA USINA

Visto que o dimensionamento da usina considerará aspectos técnicos e econômicos da estrutura a ser projetada, decidiu-se adotar uma potência instalada de 1 MW. Assim, facilita-se o estabelecimento de parâmetros de custos e define-se a potência instalada da usina em questão.

5. DIMENSIONAMENTO DA USINA

O dimensionamento da usina abordará principalmente aspectos técnicos, mostrando, dentro da acessibilidade possível, o custo dos equipamentos. A escolha dos equipamentos é apenas de caráter referencial, escolhendo os produtos que atendam aos critérios definidos no presente documento.

5.1. MÓDULO ESCOLHIDO

Há diversos módulos fotovoltaicos no mercado. Entretanto, para a seleção do módulo a ser aplicado em uma usina, deve-se atentar aos requisitos citados na metodologia do presente estudo, tais como disponibilidade no mercado nacional e sua respectiva representação comercial, e certificações internacionais. A escolha do módulo subsequente justifica-se pelo fato de que não foram encontradas informações a respeito de certificação IEC 61215 nos outros módulos pesquisados, das empresas Globo Brasil e We Brazil Energy.

Portanto, para efeito do presente trabalho, o módulo fotovoltaico escolhido foi o CS6K-270P-FG, da empresa canadense Canadian Solar. O produto possui certificação pelo INMETRO desde 24 de outubro de 2016, com o número de registro 006292/2016. Ademais, apresenta certificação IEC 61215, além de outras, garantindo a qualidade do equipamento. Suas características são apresentadas abaixo.

Tabela 12 - Características do módulo CS6K-270P-FG (Fonte: CANADIAN SOLAR, 2017).

Característica	Informação
Marca	Canadian Solar
Modelo	CS6K-270P-FG
Dimensões	1658mm x 992mm x 40mm
Área	1,64 m ²
Peso	23 kg
V _{oc}	37,9 V
I _{sc}	9,32 A
V _{MP}	30,8 V
I _{MP}	8,75 A
Potência	270 W
Eficiência	16,42 %
Preço	R\$ 579,39



Figura 24 - Módulo fotovoltaico CS6K-270P-FG (Fonte: CANADIAN SOLAR, 2017).

5.2. INVERSOR ESCOLHIDO

Visto que a usina será dimensionada na UHE Tucuruí com uma potência de 1 MW, utilizar alguns inversores de maior potência nominal é tido como uma solução mais adequada àquela que utiliza muitos inversores de pequena potência. Com isso, simplifica-se a manutenção e o sistema como um todo.

Como descrito no item anterior sobre o módulo fotovoltaico, há várias opções de inversores a serem escolhidos. Portanto, para escolha dos inversores a serem usados no projeto de uma usina, os requisitos necessários para escolha são semelhantes aos vistos para os módulos fotovoltaicos.

Na pesquisa de inversores de potência nominal superior a 10 kW, observa-se uma extrema dificuldade em encontrar produtos e seus respectivos preços. Dito isso, escolheu-se o inversor mencionado acima por ser de uma marca referência no mercado, além de possui uma maior acessibilidade frente aos seus modelos disponíveis atualmente. Em relação ao preço, encontrou-se o valor em dólares e fez-se a conversão, aceitando uma considerável margem de erro.

É de suma importância que o inversor possua as certificações internacionais citadas na metodologia, ou seja, as normas NBR IEC 62116 e NBR 16149. Portanto, para efeito do presente trabalho, a opção satisfatória foi o uso de inversores da marca WEG, modelo SIW700 T137-22, que possui a função MPPT. Suas características encontram-se abaixo.

Tabela 13 - Característica do inversor SIW700 T137-22 (Fonte: GRUPO WEG, 2016).

Característica	Informação
Marca	Grupo WEG
Modelo	SIW700 T137-22
Potência	137 kW (40°C) e 125 kW (45°C)
V_{entrada} (MPPT)	360 a 700 V
$V_{\text{saída}}$	220 V
I_{nominal}	331 A
Eficiência	97,8 %
Preço estimado	R\$150 a 250 mil

Uma opção analisada foi em relação à construção de inversores próprios frente ao alto custo do equipamento no mercado mundial. No entanto, a alternativa não apresenta praticidade nem confiabilidade em tal equipamento, uma vez que não se encontra na literatura projetos de inversores de alta potência nominal, nem mesmo para utilização em sistemas fotovoltaicos.

5.3. SISTEMAS DE FLUTUAÇÃO ANALISADOS

No que concerne ao sistema de flutuação, pode-se dizer que não há uma melhor opção, pois a melhor escolha dependerá da situação do projeto. Dessa forma, serão descritos dois tipos de sistema de flutuação: um a ser construído, de menor custo e uma maior necessidade de vistoria periódica; e um disponível no mercado, de custo mais elevado e garantia de qualidade fornecida pelo fabricante, trazendo por consequência uma menor frequência de manutenção ou supervisão.

Ao se construir um sistema de flutuação destinado à alocação de uma usina fotovoltaica, é interessante construí-lo do tipo pontão, trazendo ao projeto menor

custo por se tratar de uma estrutura mais simples. Seu sistema de amarração haveria apenas um ponto de fixação por unidade, e uma conexão entre unidade tornando o sistema modular.

Não há necessidade de utilização de quebra-mares, pois se trata de uma região onde as ondas não atingem níveis expressivos. Em relação à composição de sua estrutura, o sistema pode ser basicamente composto de boias ou barris/tambores de plástico e estrutura metálica para sustentação dos módulos fotovoltaicos.

Caso se opte por uma opção mais prática, recomenda-se o uso de flutuadores da empresa francesa Ciel et Terre. Já presente no cenário brasileiro, a empresa possui representantes no país, a empresa Sunlution, o que facilita a comunicação com o fabricante. Ademais, ela possui participação em projetos realizados com o Ministério de Minas e Energia, e produz seus equipamentos no Brasil para tal.

Por fim, deve-se mencionar o sistema de amarração. Como citado no referencial teórico do presente estudo, o seu principal componente a ser analisado é a âncora, que pode ser classificada em quatro tipos: à inércia, cogumelo, pirâmide e hélice. Todos os tipos podem ser usados no projeto em questão, mas alguns possuem uma maior valia de aplicação frente aos outros, como é o caso do tipo cogumelo e também da pirâmide, indicados para fundos lamacentos, como ocorre no Rio Tocantins. Terceiro melhor é a âncora hélice, que, apesar de ser recomendado para fundos fofos, é de complexa instalação requer manutenção periódica. Em último temos a âncora à inércia, que não é indicada para fundos com lama, mas é de fácil instalação e baixo custo.

Tabela 14 – Síntese dos sistemas de flutuação analisados.

Componentes	Fabricação própria	Disponível no mercado
Tipo de sistema	Pontão	Pontão
Quebra-mares	Ausente	Ausente
Conexão	Modular	Modular
Âncora indicada	Pirâmide	Pirâmide
Garantia do fabricante	Não	Sim

5.4. COMPOSIÇÃO DO SISTEMA

Ressalta-se que o sistema proposto no presente trabalho tem capacidade instalada de 1 MW. Uma das justificativas para essa dimensão de potência, é tentar padronizar as características de usinas para cada MW instalado. A partir das características técnicas do inversor designado, como faixa de operação da função MPPT e corrente nominal do equipamento, sabe-se a quantidade máxima de módulos conectados em série bem como a valor limite de strings conectados em paralelo. Outra justificativa para tal adoção é a possibilidade de comparar os resultados do presente trabalho com a Usina da Tauá, já existente e em plena operação no estado do Ceará.

É importante ressaltar que não é o foco deste trabalho a organização dos módulos fotovoltaicos frente à usina, e sim destacar ao leitor as características necessárias para a utilização de um sistema de flutuação que suporte tal usina.

Visto que o módulo escolhido possui $V_{oc} = 37,9 V$, a quantidade máxima de módulos associados em série para a formação de uma string é de 18 unidades, totalizando 682,2 V, valor abaixo do limite de 700 V da faixa de operação do MPPT do inversor. Visualiza-se que o módulo possui $I_{sc} = 9,32 A$, permitindo a associação de até 35 strings em paralelo, o que resultaria em 326,2 A, respeitando a limitação elétrica de 331 A do equipamento da WEG.

Junto a essa análise, apresenta-se como principal fator limitante a potência nominal do inversor, que é de 137 kW ao operá-lo a uma temperatura de 40°C e 125 kW com uma operação a 45°C. Vê-se, então, a necessidade de utilizar 8 inversores no sistema fotovoltaico em questão. Finalmente, uma solução para a disposição dos módulos é associar 16 unidades em uma única string, e associar 29 strings de forma paralela conectadas a um inversor. Dessa forma, obtém-se 125,28 kW de capacidade instalada em cada inversor, o que resulta em um sistema de 1,002 MW obtidos por meio de 3.712 módulos.

5.5. ESPAÇO UTILIZADO

Utilizando as equações presentes na seção 2.3, assume-se um $d = 1,007 m$. Visto que a área de cada módulo é de aproximadamente 1,64 m², então o espaçamento entre dois módulos ocupará uma área de 1,007 x 0,992, ou seja, 1 m².

Sabe-se também que os espaços são entre os módulos, o que significa dizer que para 29 strings de 16 módulos em cada inversor, teremos 28 fileiras de 16 espaços iguais. Finalmente, calcula-se a área total utilizada no reservatório: 9.660,6 m².

Nota-se, então, uma significativa diferença entre o espaço calculado no presente estudo e o utilizado na Usina Fotovoltaica de Tauá, que apresenta 12.000 m² para 1 MW instalado. Isso se dá principalmente pela potência do painel utilizado, que é de 215 Wp, enquanto o citado no item 5.1 possui 270 Wp e possui dimensões físicas semelhantes.

5.6. CONFIGURAÇÃO FINAL DOS COMPONENTES DA USINA

O foco do presente trabalho foi propor a configuração de uma usina fotovoltaica com módulos flutuantes e potência instalada de 1MW, a ser instalada na UHE de Tucuruí. Vale ressaltar que foi escolhida apenas um modelo de módulo fotovoltaico e um modelo de inversor de frequência. Contudo, há quatro opções possíveis de configuração final dos componentes da usina (A, B, C e D), os quais estão listados a seguir:

- 3.712 Módulos Fotovoltaicos Canadian Solar CS6K-270P-FG;
- 8 Inversores Solares WEG SIW700 T137-22.

Tabela 15 - Configurações propostas para composição da usina.

Componente	Configuração			
	A	B	C	D
Sistema de flutuação	Fabricação própria	Disponível no mercado	Fabricação própria	Disponível no mercado
Tipo de âncora	Cogumelo	Pirâmide	À inércia	À inércia

Na tentativa de propor uma metodologia para a escolha dos componentes da usina, o presente trabalho definiu pesos para cada item da configuração, levando em consideração a sua relevância na composição do sistema. Inicialmente, dois critérios foram atribuídos: técnico e econômico. Estabeleceu-se que o fator técnico possui uma maior importância no sistema frente ao econômico, por isso seu peso representa 60% da nota total, enquanto que o critério econômico representa 40%.

Em um segundo nível hierárquico, dentro do critério técnico adotou-se o sistema de flutuação como mais importante do que a âncora. Já no aspecto econômico, em segundo nível hierárquico, o custo do projeto é dominante em relação à mão-de-obra e à manutenção do sistema. Para cada configuração dos componentes da usina (A, B, C e D), foram dadas notas de acordo com a avaliação desenvolvida no presente trabalho, resultando em um ranking das configurações. A Tab. (16) abaixo sintetiza a metodologia descrita acima.

Tabela 16 - Tabela qualitativa comparando as quatro construções descritas de sistemas fotovoltaicos flutuantes.

		Peso	Notas			
			A	B	C	D
Técnico	Sistema de flutuação	0,4	8	9	8	9
	Âncora	0,2	8	9	5	5
Econômico	Menor custo	0,2	10	4	9	5
	Menor mão-de-obra	0,1	6	9	7	9
	Menor manutenção	0,1	7	9	8	9
Ranking			8,1	8,0	7,5	7,4

Como visto na tabela acima, a configuração ideal proposta a ser instalada na UHE Tucuruí é a configuração A, uma vez que apresenta leve vantagem (Ranking 8,1) em relação à configuração B (Ranking 8,0). Em resumo, vê-se o primeiro como um sistema relativamente mais simples e mais barato, de custo inferior.

Em sistemas com capacidade instalada de até 1 MW, ainda é viável a utilização de um sistema de flutuação de fabricação própria. Contudo, quanto maior for o projeto, mais interessante é a contratação de um sistema de flutuação disponível no mercado, trazendo garantias do fabricante e, por conseguinte, resultando em uma maior confiabilidade da estrutura de sustentação dos módulos fotovoltaicos.

Já as configurações C e D não se mostraram atrativos do ponto de vista do Ranking simplesmente por basearem-se na utilização de âncora do tipo à inércia, que é recomendada para fundos rochosos. Conseqüentemente, a adoção dessas

configurações acarreta em uma fixação menos estável em fundos lamacentos em relação às outras opções, deixando a usina sujeita a maiores movimentações juntamente ao movimento da água do reservatório.

6. CONCLUSÃO

Como previsto no último PDE, o SIN expandirá em 55% entre 2014 e 2024, representando assim 75,6 GW a mais de capacidade instalada no país. Desse valor, praticamente 50% será proveniente de fontes renováveis, não incluindo as UHEs e sim usinas solares, eólicas, térmicas à biomassa e PCHs.

O notável crescimento mundial da energia solar fotovoltaica pode ser também observado no Brasil, mas em menor escala. Vê-se como uma conveniente forma de impulsionar o setor a adoção de usinas flutuantes, em local de extrema abundância em território nacional: reservatórios de usinas hidrelétricas. Além de aproveitar um espaço ocioso, pode-se ainda utilizar as instalações elétricas já realizadas, tornando o sistema presente híbrido e com maior fator de utilização.

Concomitantemente a isso, notam-se diversos benefícios atrelados ao uso de usinas solares flutuantes. Uma exemplificação disso é o aumento da eficiência do sistema, por funcionar sobre a água e, por conseguinte, com uma menor temperatura de operação. Pode-se citar também a redução da evaporação da água do corpo em questão, e a praticidade de limpeza dos módulos por permitir a utilização da própria água do lago.

Entretanto, resta ainda quantificar esses benefícios supracitados no Brasil, uma vez que cada país possui suas peculiaridades climáticas, influenciando assim de maneira única. Ademais, deve-se atentar também para seus potenciais impactos ambientais causados, influenciando na fauna e flora presentes com o sombreamento da região coberta e o sutil aumento de temperatura da água.

Analisando o estudo de caso proposto, vê-se que com aproximadamente 10.000 m² obtém-se uma usina flutuante de 1 MW, com a implementação de 3.712 módulos de 270 W cada. É necessária a verificação de algumas certificações, tanto para módulos fotovoltaicos como para inversores solares a fim de escolher produtos de qualidade atestada em um projeto.

Com o fator limitante de 40% de acréscimo permitido às instalações elétricas das usinas hidrelétricas sem a necessidade de novos investimentos no quesito, conclui-se que seria necessária uma superfície de 33 km² para gerar uma potência

adicional de 3.414 MW à UHE Tucuruí, o que representa 1,16% do espelho d'água presente.

Adicionalmente, a escolha do sistema de flutuação depende da dimensão da usina projetada e dos critérios técnicos e econômicos citados na seção 5.6. Uma vez que o valor fixado para o dimensionamento da usina fotovoltaica flutuante na UHE Tucuruí no presente estudo foi de 1 MW, a melhor alternativa encontrada foi a fabricação de um sistema de flutuação próprio, como evidenciado na Tab. (15). Já para usinas de maiores dimensões é válida a contratação de uma empresa especializada no ramo, a fim de reduzir eventuais problemas de manutenção e instalação, conferindo ao projeto uma maior segurança e confiança na estrutura de sustentação dos módulos fotovoltaicos.

O sistema de amarração, associado diretamente com o mecanismo de flutuação em uma usina flutuante, deve ser analisado, observando principalmente a âncora a ser estabelecida para o empreendimento visado. Nesse sentido, deve-se ter preferência por âncora do tipo pirâmide ou cogumelo para aplicação em fundos lamacentos, e âncoras à inércia para fundos rochosos. As âncoras do tipo hélice, por necessitarem de manutenção periódica e possuírem uma instalação complexa, devem ser evitadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002. 153 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração (BIG)**. Brasília: ANEEL, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 16 mai. 2017.

ANDRIANOV, Alexey. **Hydroelastic Analysis of Very Large Floating Structures**. Delft, Países Baixos: Delft University of Technology, 2005.

BEIGELMAN, Bruno Boaventura. **A Energia Solar Fotovoltaica e a Aplicação na Usina Solar de Tauá**. 2013. 61 f. Monografia (Especialização) – Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

BOSCH. **Installation and Safety Manual: c-Si M60(S) NA 30117 and NA 42117 Families of Crystalline Photovoltaic Modules**. Erfurt, Alemanha: Bosch Solar Energy Corp., 2013.

CIEL ET TERRE BRASIL. **Apresentação da empresa: O conhecimento dos flutuadores solares**. São Paulo, 2015.

CIEL ET TERRE. Nos réalisations. 2017. Disponível em < <http://www.ciel-et-terre.net/fr/nos-realisations/>>. Acesso em 31 mai. 2017.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Nova regra de aceitação de inversores**. Belo Horizonte: CEMIG, 2016.

DONG-HWAN, Lee (Org.). **New technology of the floating photovoltaic power plant on the reservoir of dams**. Coreia do Sul: K-Water, 2015.

EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO. **Brasil inaugura primeira usina solar flutuante do mundo em lago de hidrelétrica**. Brasília: EBC, 2016.

FRAUNHOFER ISE. Current and Future Cost of Photovoltaics: Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende. Freiburg, Alemanha: Fraunhofer ISE, 2015.

FRAUNHOFER ISE. **Photovoltaic Report**. Freiburg, Alemanha: Fraunhofer ISE, 2016.

GRUPO WEG. Unidade Automação. **Automação: Inversores Fotovoltaicos SIW**. Jaraguá do Sul: WEG, 2016.

GALDINO, Marco Antonio; OLIVIERI, Marta Maria (Org.). **Some remarks about the deployment of floating PV systems in Brazil**. Rio de Janeiro: CEPTEL/ELETRONBRAS, 2017.

HARTZELL, Tynan Scott. **Evaluating potential for floating solar installations or Arizona Water Management Infrastructure**. Tucson, EUA: University of Arizona, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática: Tucuruí – PA**. Brasília: INMET, 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>>. Acesso em 30 mai. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria nº 004, de 04 de janeiro de 2011**. Brasília: INMETRO, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria nº 017, de 14 de janeiro de 2016**. Brasília: INMETRO, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria nº 357, de 01 de agosto de 2014**. Brasília: INMETRO, 2014.

KALOGIROU, Soteris A.. **Engenharia de Energia Solar: Processos e Sistemas**, 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 864 p.

KRISHNAVENI, N.. **A survey on floating solar power system**. Tamilnadu, Índia: Mahalingam College of Engineering and Technology, 2016.

MICHELS, Adalberto Sato et al. **Avaliação de um inversor fotovoltaico conectado à rede elétrica**. Curitiba: UTFPR, 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Hidrelétrica Balbina inicia projeto com flutuadores para gerar energia elétrica. Brasília: MME, 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial>>. Acesso em: 25 mai. 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Brasília: MME/EPE, 2015.

MISTRY, Nirav T. et al. **Floating Solar Power Plant**. Vadodara (Índia): Sigma Institute of Engineering, 2017.

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION (NOAA). **Magnetic Field Calculators: Magnetic Declination Estimated Value**. Disponível em: <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination>>. Acesso em: 25 mai. 2017.

OHKUBO, Hiroshi et al. **Development of a Very Large Floating Structure**. Tóquio: Nippon Steel & Sumitomo Metal, 2000.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (Org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. **Renewables 2016: Global Status Report**. Paris, França: REN21, 2016.

SHARMA, Aseem Kumar. **Floating solar PV potential in large reservoirs in India**. Kolkata, Índia: Chandradeep Solar Reserach Institute, 2016.

THAMES WATER. **Europe's biggest floating solar panel project charges ahead in London**. 2016. Disponível em: <<http://www.thameswater.co.uk/media/press-releases/19301.htm>>. Acesso em 02 nov. 2016.

MUSSON, Noel. **A preliminary guide to mooring systems, mooring choices and mooring selection**. Augusta, Canadá: The Musson Group, 2015.

TIBA, Chigueru et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p.

TOLMASQUIM, Maurício T.. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016. 452 p.

VILLALVA, Marcelo Gradella ; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012. 225 p.

WATANABE, E. et al. **Very Large Floating Structures: Applications, analysis and design**. Singapura: Centre for Offshore Research and Engineering National Univesity of Singapore, 2004.