



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
Faculdade de Engenharia Mecânica

**FELIPE EMANUEL SALES**

# **Influência da Temperatura na Geração de Energia Elétrica em uma Usina Solar Fotovoltaica Flutuante**

CAMPINAS  
2023

**FELIPE EMANUEL SALES**

# **Influência da Temperatura na Geração de Energia Elétrica em uma Usina Solar Fotovoltaica Flutuante**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia  
Mecânica da Universidade Estadual de Campinas  
como parte dos requisitos exigidos para obtenção  
do título de Mestre em Planejamento de Sistemas  
Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Ennio Peres da Silva

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO  
ALUNO FELIPE EMANUEL SALES, E ORIENTADO  
PELO PROF. DR ENNIO PERES DA SILVA

**CAMPINAS  
2023**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Sa32i Sales, Felipe Emanuel, 1996-  
Influência da temperatura na geração de energia elétrica em uma usina solar fotovoltaica flutuante / Felipe Emanuel Sales. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Ennio Peres da Silva.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Sistemas de energia fotovoltaica. I. Silva, Ennio Peres da, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**Informações Complementares**

**Título em outro idioma:** Influence of temperature on electric power generation in a floating photovoltaic solar power plant

**Palavras-chave em inglês:**

Photovoltaic power generation

Photovoltaic energy systems

**Área de concentração:** Planejamento de Sistemas Energéticos

**Titulação:** Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos

**Banca examinadora:**

Ennio Peres da Silva [Orientador]

Demóstenes Barbosa da Silva

Karina Maretti Strangueto

**Data de defesa:** 27-02-2023

**Programa de Pós-Graduação:** Planejamento de Sistemas Energéticos

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-1153-4449>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/9538794004204252>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

# **Influência da Temperatura na Geração de Energia Elétrica em uma Usina Solar Fotovoltaica Flutuante**

Autor: Felipe Emanuel Sales

Orientador: Prof. Dr. Ennio Peres da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

**Prof. Dr. Demóstenes Barbosa da Silva**  
**BASE Energia Sustentável**

**Prof. Dr. Ennio Peres da Silva**  
**NIPE/Campinas/Unicamp**

**Profa. Dra. Karina Marette Strangueto**  
**Direção-geral/Jundiaí/IFSP**

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 27 de fevereiro de 2023

## **Agradecimentos**

Aos meus pais José e Silvia, meus avós Dioraci e Sebastiana, por todo incentivo e compreensão.

À minha namorada Thaís, por todo auxílio e encorajamento.

Ao professor Ennio, pela oportunidade e orientação.

A todos os professores e colegas do PSE, pela troca de experiência e conhecimento.

Às empresas CNPq, FURNAS e BASE pelo fomento.

Ao NIPE pelo suporte.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo 130406/2021-0.

## Resumo

No panorama energético mundial hodierno, a utilização de fontes não renováveis para a produção de energia e todos os malefícios atrelados ao seu uso, faz com que os objetivos para a promoção do desenvolvimento sustentável estejam cada vez mais aflorados na sociedade. Em meio às fontes de energia que vem mais ganhando destaque, a energia solar fotovoltaica flutuante, além de ser um recurso alternativo no contexto ambiental, minimiza a competição por terras agricultáveis, oportunizando também um maior desempenho frente aos sistemas fotovoltaicos constituídos em solo, em virtude do microclima local propiciado pelo corpo d'água, que influi no arrefecimento da temperatura de operação dos módulos. Estudos do impacto da temperatura na operação dessa tipologia de sistema são poucos difundidos na literatura, e, ainda, os softwares de simulação específicos para geração solar não são condicionados a realizar modelagens que representem os ganhos desse tipo de projeto. Vislumbrando contribuir na análise do impacto da temperatura na geração de energia elétrica de uma usina solar fotovoltaica flutuante, essa dissertação foi concebida. Para entender as tendências e as características construtivas das usinas flutuantes, foram catalogados 166 empreendimentos em operação no âmbito mundial. Também, foi analisado na literatura o ganho médio de usinas flutuantes, em trabalhos que confrontaram estas com usinas de solo em uma mesma região. Dispondo de uma usina fotovoltaica flutuante e outra de solo existentes na hidroelétrica de Furnas, em Itumbiara (GO), foi realizada uma análise comparativa entre a produção de energia simulada com o software PVSYST, com os dados obtidos através da memória de massa do seus respectivos inversores. Para contemplar o efeito da proximidade do sistema flutuante com o corpo da água, o coeficiente de transferência de calor do modelo térmico do software foi alterado. Dentre os resultados obtidos, dada a influência da temperatura, foi simulado um ganho médio anual de 3,5% na produção da energia da usina flutuante. Para minimizar interferências do sistema de ancoragem, amarração e flutuação, que possui caráter experimental, os resultados de maio de 2022 foram destacados, onde, a energia simulada para a usina de solo foi de 128,90 kWh/kWp e a energia simulada para a usina flutuante foi de 141,01 kWh/kWp (9,39% de ganho esperado pela influência da temperatura). Já os dados experimentais mostraram que a energia de solo produzida foi de 131,46 kWh/kWp e a flutuante de 140,73 kWh/kWp (7,05% de ganho como resultado pela influência da temperatura).

**Palavras Chave:** Geração de energia fotovoltaica; Sistemas de energia fotovoltaica.

## Abstract

In the current energetic landscape, side-effects from non-renewable electricity generation, such as greenhouse-gas emissions and the consequent warming of the planet, drive the objectives of sustainable development to prominence. Floating photovoltaics (FPV) are one of the promising alternative energy sources. This renewable technology can also reduce competition for agricultural land. The water, in which the system floats, acts as a coolant for the photovoltaics (PV) modules, making the system more efficient compared to the conventional, on land. The literature is scarce about the impact temperature has on this type of system. Also, software used for solar generation simulation do not consider this effect for modelling. This dissertation thus aimed to analyze the impact temperature has on FPV systems. The trends and characteristics of 166 FPV plants operating worldwide were analyzed. Average gains for FPV were compared with conventional PV within the same region. A comparative analysis was carried between a FPV and a conventional PV located at the Furnas Hydroelectric Power Plant, in Itumbiara (GO-BR). Simulated energy production, carried in the PVSYST software, was compared with that obtained in the inverters' mass memory. The software's heat transfer coefficient was modified to account for the FPV modules proximity to the water. A 3.5% average annual increase in energy production, owed to temperature effects, was obtained. Due to the experimental nature of the anchorage, mooring and floating systems, results for May-2022 are highlighted, to minimize their interference. Simulated values for the FPV and PV plants were 141.01 kWh/kW<sub>p</sub> vs. 128.90 kWh/kW<sub>p</sub>, respectively (9.39 % gains due to the temperature effect). Experimental values were 140.73 kWh/kW<sub>p</sub> vs. 131.46 kWh/kW<sub>p</sub> (7.05 % gains).

**Key Word:** Photovoltaic power generation; Photovoltaic energy systems.

## Lista de Ilustrações

Figura 1: Capacidade instalada mundial de energia renovável .....	13
Figura 2: Custo médio ponderado (LCOE) de projetos fotovoltaicos em diversos países..	17
Figura 3: Custo médio ponderado (LCOE), fator de capacidade e custo total de projetos fotovoltaicos no mundo. ....	18
Figura 4: Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil. ....	19
Figura 5: Quantidade de empregos por tecnologia de energia renovável no ano de 2019..	20
Figura 6: Representação simplificada do sistema fotovoltaico conectado à rede. ....	21
Figura 7: Representação simplificada do sistema fotovoltaico Off Grid. ....	22
Figura 8: Representação simplificada de um sistema híbrido. ....	23
Figura 9: Capacidade instalada das usinas fotovoltaicas flutuantes catalogadas. ....	25
Figura 10: Concentração das usinas fotovoltaicas flutuantes no mundo por país. ....	26
Figura 11: Capacidade das usinas fotovoltaicas flutuantes no mundo por país .....	26
Figura 12: Evolução da capacidade instalada de usinas fotovoltaicas flutuantes no mundo, por empreendimento. ....	27
Figura 13: Planta flutuante da UHE de Itumbiara .....	28
Figura 14: Planta em solo e sistemas de armazenamento da UHE de Itumbiara .....	29
Figura 15: Croqui de localização das usinas fotovoltaicas de Furnas. ....	30
Figura 16: Flutuadores “tipo passarela” da UHE de Itumbiara. ....	31
Figura 17: Sistema de flutuadores da usina de Furnas. ....	31
Figura 18: Sistema de ancoragem da usina de Furnas. ....	32
Figura 19: Sistema de amarração da usina de Furnas. ....	33
Figura 20: Fluxograma sucinto da metodologia do trabalho. ....	35
Figura 21: Estimativa do ângulo azimutal da usina flutuante. ....	40
Figura 22: Estimativa do ângulo azimutal da usina de solo. ....	40
Figura 23: Inclinação do plano e azimute para usina de solo. ....	41
Figura 24: Inclinação do plano e azimute para usina flutuante. ....	41
Figura 25: Arranjo fotovoltaico do inversor analisado da planta flutuante da usina de Itumbiara. ....	42
Figura 26: Arranjo fotovoltaico do inversor analisado da planta de solo da usina de Itumbiara. ....	42
Figura 27: Representação esquemática dos ângulos e parâmetros envolvidos na inclinação de um plano sob radiação solar em relação à horizontal. ....	44

Figura 28: Simulação computacional para irradiações incidente, horizontais e nas inclinações de 22 e 14 graus. ....	46
Figura 29: Dados hidrológicos do reservatório de Furnas. ....	49
Figura 30: Temperatura ambiente e rajadas de vento na cidade de Itumbiara-GO. ....	50
Figura 31: Distribuição de potência na saída do inversor (CA), usina de solo. ....	51
Figura 32: Perdas devido ao posicionamento dos módulos da usina de solo. ....	51
Figura 33: Previsão de geração de energia da usina de solo. ....	52
Figura 34: Distribuição de potência na saída do inversor (CA), usina flutuante. ....	52
Figura 35: Perdas devido ao posicionamento dos módulos da usina flutuante. ....	53
Figura 36: Previsão de geração de energia da usina flutuante. ....	53
Figura 37: Comparativo da previsão de geração de energia normalizada para o ano de 2022, sem correção azimutal e de inclinação. ....	54
Figura 38: Radiação esperada para o mês de maio de 2022. ....	55
Figura 39: Energia diária produzida pelo sistema de solo. ....	56
Figura 40: Energia diária produzida pelo sistema flutuante. ....	56
Figura 41: Comparação da energia normalizada produzida com a energia simulada das plantas para o mês de maio de 2022. ....	57
Figura 42: Energia diária produzida pelo sistema solo, na mesma base de comparação a flutuante (inclinação e azimute). ....	61
Figura 43: Comparação da energia normalizada das usinas. ....	62
Figura 44: Comparação do ganho de performance simulado com o efetivo pela influência da temperatura no mês de maio de 2022. ....	62
Figura 45: Comparativo da previsão de geração de energia normalizada para o ano de 2022, com correção azimutal e de inclinação. ....	63
Figura 46: Desorientação dos módulos fotovoltaicos promovido pelas ondas. ....	64

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Vantagens e desvantagens da energia solar fotovoltaica. ....	14
Tabela 2: Vantagens e desvantagens da energia solar fotovoltaica flutuante.....	24
Tabela 3: Especificações do módulo Trina Solar de 390 WP. ....	37
Tabela 4: Especificações do inversor SMA de 75 kW. ....	37
Tabela 5: Dados climatológicos da região de Itumbiara. ....	38
Tabela 6: Parâmetros de perdas no âmbito fotovoltaico.....	39
Tabela 7: Exemplificação do banco de dados bruto. ....	42
Tabela 8: Exemplificação do banco de dados estruturado. ....	43
Tabela 9: Ângulo solar de Itumbiara para os dias do mês de maio de 2022. ....	57
Tabela 10: Coeficiente de equivalência de inclinação da produção solar a 14° e 22° na região de Itumbiara para o mês de maio 2022.....	59
Tabela 11: Coeficiente de equivalência de inclinação a 14° e 22° e azimute a 2° e 8°, respectivamente, na região de Itumbiara para o mês de maio 2022. ....	60
Tabela 12: Ganho com efeito da temperatura encontrado na literatura.....	63

# SUMÁRIO

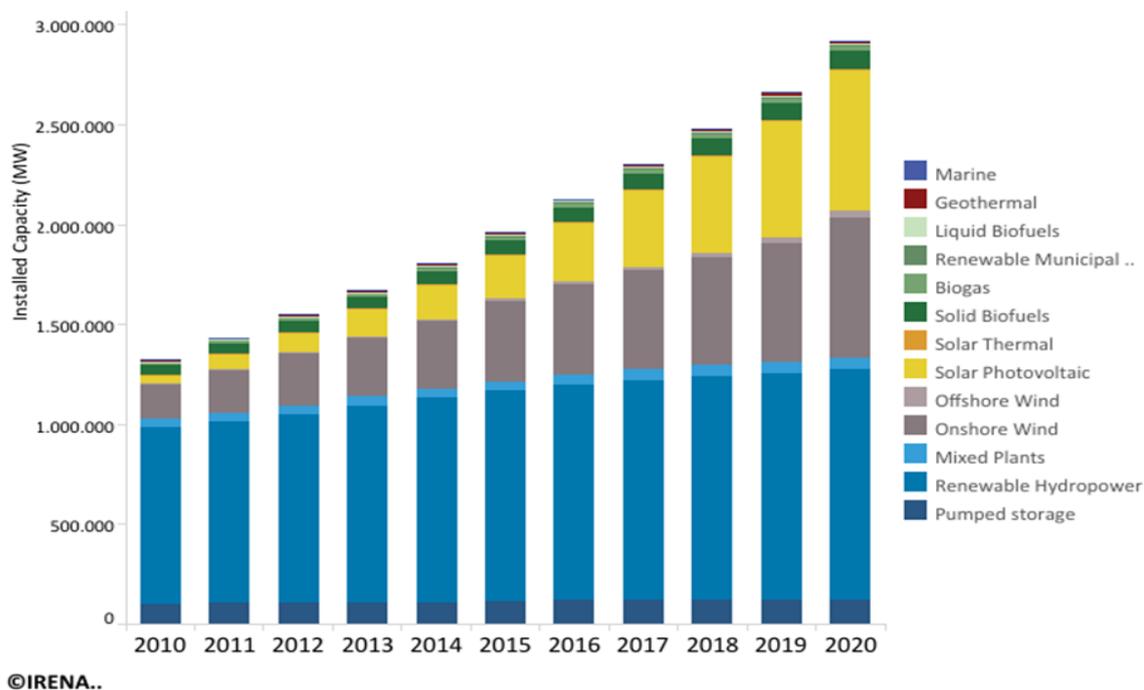
1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivo .....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 Energia fotovoltaica.....	16
2.2 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOITAICOS .....	20
2.2.1 Conectados à Rede ( <i>on grid</i> ) .....	21
2.2.2 Autônomos ( <i>off grid</i> ).....	21
2.2.3 Híbridos .....	22
2.3 Gerador fotovoltaico flutuante.....	23
2.3.1 Influência da temperatura .....	27
2.3.2 Caracterização da usina flutuante de Itumbiara (GO) .....	28
3 METODOLOGIA.....	34
3.1 Determinação do potencial solar fotovoltaico teórico.....	36
3.2 Modelagem dos geradores no PVSYST.....	37
3.3 Coleta e processamento dos dados .....	41
3.4 Comparação em uma base comum.....	43
3.5 Base dados climatológicos .....	46
3.6 Indicadores de desempenho dos sistemas fotovoltaicos .....	46
3.7 Sobredimensionamento de módulos fotovoltaicos ( <i>oversizing</i> ).....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	66
REFERÊNCIAS .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

A ONU - Organização das Nações Unidas, no ano de 2015, estabeleceu o Acordo de Paris, com o objetivo de conter o aumento da temperatura global abaixo de 1,5 °C em comparação aos níveis pré-industriais, através de uma agenda com dezessete objetivos para promoção do desenvolvimento sustentável. Dentre eles, o sétimo trata especificamente do aumento substancial da participação das fontes renováveis de energia na matriz energética global, que terão suma relevância para o desenvolvimento da transição energética mundial (UNGA, 2020). Dentre outros movimentos internacionais com intuito consonante, se destaca os programas *Race To Zero* da UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*, que engaja cidades, empresas, investidores e universidades a buscar a neutralidade das emissões de carbono até 2050 (UNFCCC, 2022); a campanha *Business Ambition for 1,5 °C*, liderada pela UNGC – *United Nations Global Compact*, que instiga empresas a aderirem às emissões líquidas de carbono a zero até 2050 (UNGC, 2019) e a iniciativa *Science Based Target*, que é resultado da parceria de várias instituições para fornecer ao âmbito empresarial ferramentas e metas baseadas na ciência para redução da emissões (SBT, 2022). Com enfoque no Brasil, o programa *A ambição Net Zero*, da instituição Pacto Global, difunde os objetivos dos programas *Race to Zero* e *Business Ambition for 1,5 °C* (PACTO GLOBAL, 2022).

Dentre as soluções e tecnologias que fomentam a descarbonização, a produção de energia através de fontes renováveis mostram um expressivo crescimento (DE CASTRO, 2021). No contexto mundial, a capacidade instalada de fontes de energia renovável aumentou mais de 220% nos últimos 10 anos, passando de 1.323,775 GW em 2010 para 2.920,365 GW em 2020, com notória participação da energia eólica e solar fotovoltaica nessa crescente, como pode ser observado na Figura 1 (IRENA, 2020a).

Figura 1: Capacidade instalada mundial de energia renovável



Fonte: IRENA (2021a).

O princípio de funcionamento da energia solar fotovoltaica consiste em captar a irradiação do sol e transformá-la diretamente em eletricidade na forma contínua. Segundo SAMPAIO et al. (2017), as principais vantagens advindas desses geradores são: ser um sistema confiável; possuir baixo custo de operação e manutenção; ser uma fonte limpa de alta disponibilidade, silenciosa e favorável ao meio ambiente, pois não causa impactos ambientais durante a geração de energia. Em contrapartida, as principais desvantagens são: ter um alto custo de aquisição, acarretando aumento no custo da energia produzida; ser intermitente e ter uma baixa produtividade ambiental (SILVA, 2016).

Energeticamente, além das vantagens mencionadas, essa tecnologia aumenta a independência energética regional, fomenta a eletrificação rural em países em desenvolvimento, diversifica a matriz, aumenta a segurança energética e reduz a necessidade da construção de linhas de transmissão (TSOUTSOS et al., 2005), podendo ser aplicada em situações remotas e descentralizadas. Ambientalmente, apesar de não emitir poluentes quando em operação, apresenta impactos ambientais relativos aos combustíveis fósseis utilizados na fabricação dos seus equipamentos (PENG et al., 2013) e na problemática da ocupação do solo, como já mencionado. Socialmente, são originadas oportunidades de trabalho significativas na

fase de projetos, de construção de usinas, no seu comissionamento, operação e manutenção, demandando mão de obra com grande amplitude de qualificação, gerando também empregos permanentes (PIMENTEL DA SILVA et al., 2018), em que pese o fato de reduzir a mão de obra utilizada na cadeia das fontes fósseis, substituídas por essa fonte renovável. A Tabela 1 sintetiza um apanhado dos aspectos positivos e negativos da energia solar fotovoltaica, relacionando-os com o campo ambiental, social e energético.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens da energia solar fotovoltaica.

<b>Aspecto</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Ambiental	Fonte renovável Limpa, em funcionamento Silenciosa	Combustíveis fósseis no ciclo de vida Grande área de instalação
Energético	Diversificação da matriz Evita construção de linhas de transmissão Baixo custo O&M Alta confiabilidade Alta disponibilidade	Intermitência Custo de aquisição
Social	Geração de empregos Acesso à energia Sistemas isolados	Custo da energia Uso do solo

Fonte: elaboração própria.

É notório o predomínio de benefícios atreladas ao uso da energia fotovoltaica, contudo, a intermitência e a necessidade da instalação em uma área substancial são empecilhos à sua propagação. Nesse contexto, sua aplicação em lagos, rios e mares é uma alternativa, visto que, em paralelo à resolução da diversidade do espaço, o desempenho dos painéis fotovoltaicos nessas condições é maior, pois operam em menores temperaturas (EPE, 2020). O sistema fotovoltaico flutuante (SFF) possui um potencial de rápida expansão, principalmente quando agregado em reservatórios de acumulação. Segundo estudo elaborado pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável do Departamento dos Estados Unidos (NREL), existem 379.068 reservatórios de usinas hidroelétricas que podem adicionar 7,6 TW de capacidade instalada no mundo (LEE et al., 2020). Segundo Strangueto (2016) o potencial dos reservatórios

brasileiros é estimado em aproximadamente 4,5 TWp para essa tipologia de projeto. Contudo, ainda não foi constatado com clareza os ganhos de desempenho acerca desse arranjo (EPE, 2020). Visando o grande potencial de expansão da configuração da tecnologia de sistemas fotovoltaicos flutuantes (SFF) em lagos de hidroelétricas, assim como a necessidade da avaliação do incremento de performance promovido pelo efeito da temperatura, essa dissertação foi concebida.

## 1.1 Objetivo

Essa dissertação teve como objetivo principal avaliar o desempenho esperado para as plantas fotovoltaicas da Usina Hidroelétrica de Itumbiara, em solo e flutuante, de maneira teórica, incluindo alguns resultados experimentais, buscando avaliar os desempenhos na produção de energia elétrica.

Para isso, foi modelado em *software* específico o arranjo terrestre e flutuante da usina de Itumbiara-GO e simulada a produção de energia elétrica esperada dada a influência da temperatura do corpo da água, comparando o sistema flutuante com outros semelhantes no mundo.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

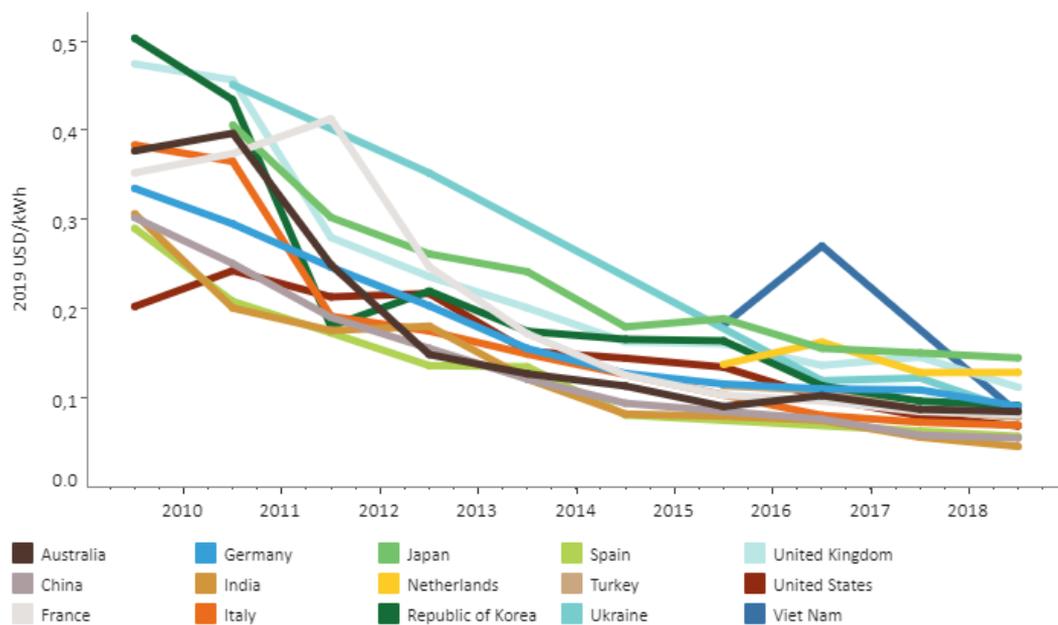
Nesse capítulo é apresentado uma revisão acerca da energia solar fotovoltaica, demonstrando sua evolução nacional e mundialmente. Além disso, são definidos os principais conceitos e parâmetros utilizados no trabalho.

### 2.1 Energia Fotovoltaica

O conceito da geração de energia elétrica com a utilização de módulos fotovoltaicos é amplamente difundido em diversos trabalhos científicos. Conforme apresentado por Buresch (1983), o princípio de funcionamento, os resultados das ligações elétricas e os efeitos que influenciam no desempenho do sistema, com as tecnologias predominantes comercialmente no mercado atual (baseadas no silício), já são discutidos há mais de três décadas. O estado da arte, as vantagens, desvantagens e um panorama de mercado podem ser observados de maneira abrangente no trabalho desenvolvido por Sampaio (2017). Os diversos materiais para o aproveitamento da energia solar fotovoltaica para conversão de em energia elétrica são apresentados por Parida (2011). Em virtude do objeto do trabalho ter sido realizar uma análise do desempenho esperado para geradores fotovoltaicos já estabelecidos, as particularidades mencionadas anteriormente não serão abordadas.

No que se refere ao crescimento da energia solar fotovoltaica no mundo, o relatório apresentado pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA - *International Renewable Energy Agency*) demonstra uma diminuição a nível global no custo médio ponderado – LCOE (*Levelized Cost of Energy*) de usinas fotovoltaicas recém comissionadas (IRENA, 2020a), conforme Figura 2.

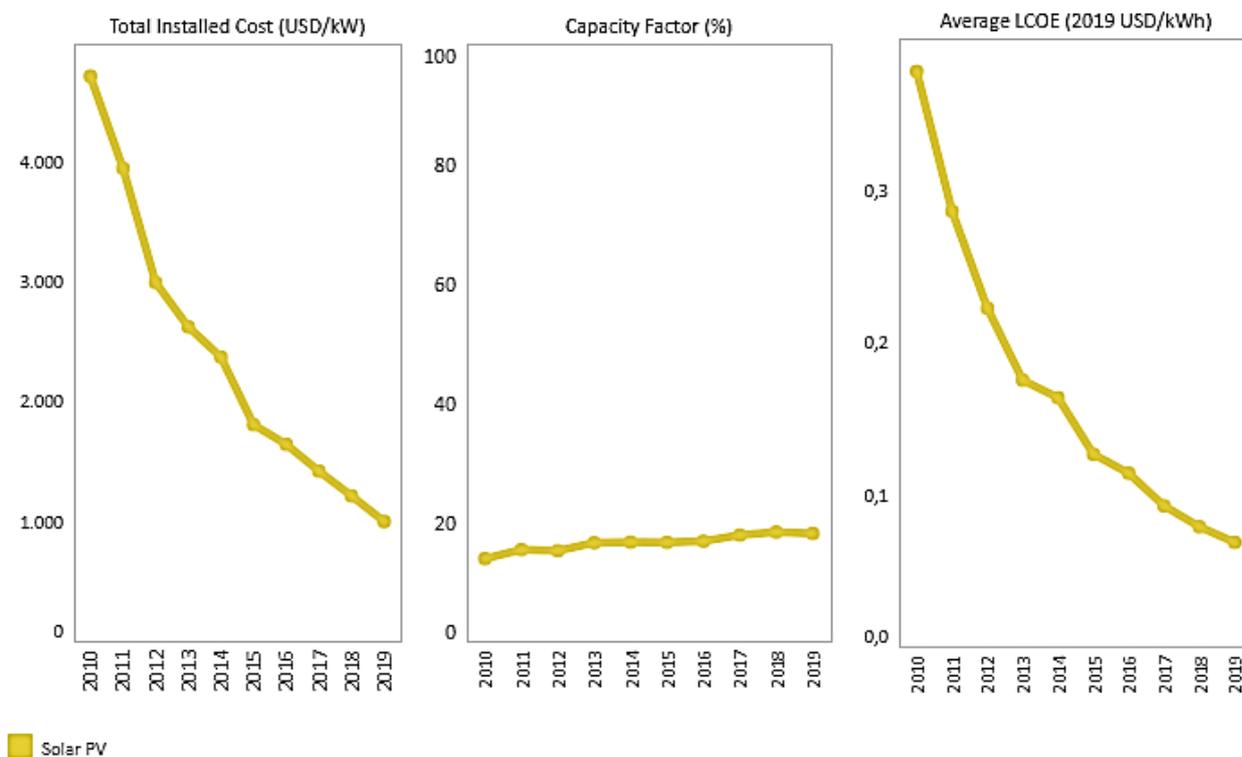
Figura 2: Custo médio ponderado (LCOE) de projetos fotovoltaicos em diversos países.



Fonte: IRENA (2020a).

Essa variável permite uma avaliação geral da viabilidade técnica e econômica desse tipo de empreendimento, pois não considera apenas o investimento inicial, mas também os custos administrativos, de operação e manutenção, essenciais ao funcionamento do sistema (KOMILOV, 2021). Em análise complementar, o mesmo relatório aponta o custo instalado do kW e o fator de capacidade percentual de projetos fotovoltaicos. De acordo com a Figura 3, há uma tendência de minimização dos custos dos projetos fotovoltaicos e um aumento de seu fator capacidade.

Figura 3: Custo médio ponderado (LCOE), fator de capacidade e custo total de projetos fotovoltaicos no mundo.



Fonte: IRENA (2020a).

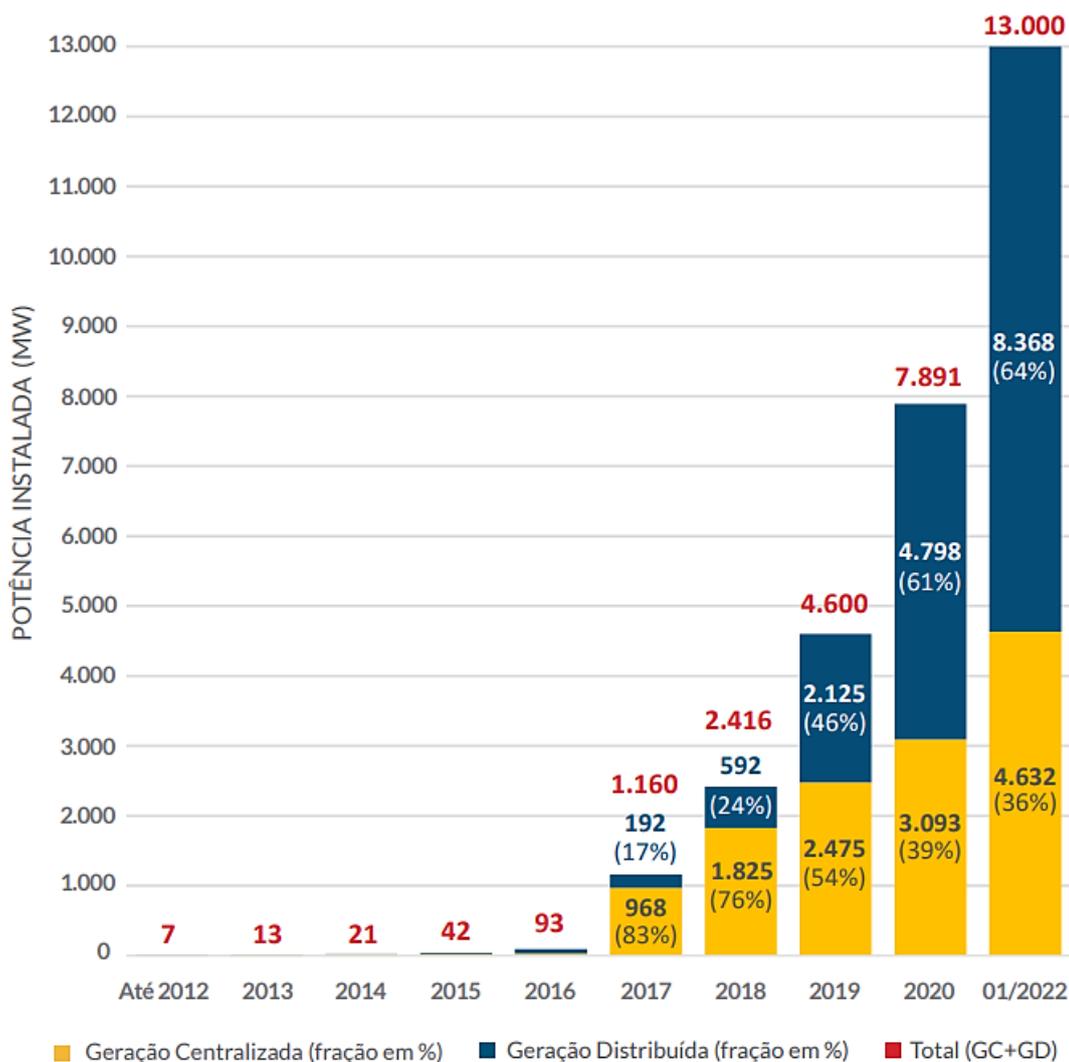
O fator de capacidade indica o desempenho do projeto em uma relação de proporcionalidade entre a energia gerada e a capacidade instalada, denotando uma propensão no aumento da eficiência das usinas (evidenciado pelo aumento do fator de capacidade), uma diminuição do investimento inicial (diminuição do preço do kW) e uma redução dos custos administrativos (diminuição do LCOE).

No Brasil, a participação da fonte solar fotovoltaica na capacidade instalada da matriz elétrica nacional tem se tornado cada vez mais significativa. Impulsionada por ações regulatórias, na modalidade de micro e minigeração distribuída (potência limitada a 75 kW e 5 MW, respectivamente), no ano de 2020, o recurso proporcionou a geração de 4.764 GWh (BEN, 2021). Ainda, segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar – ABSOLAR, em janeiro de 2022, 1,7 % oferta de energia elétrica no Brasil foi suprida por energia solar fotovoltaica (ABSOLAR, 2022a).

Conforme dados da mesma associação, consolidando os projetos de geração distribuída e centralizada, o Brasil atingiu a marca de 13.000 MW de potência instalada em energia solar

até o início de 2022 (até janeiro 2022 representado na figura abaixo por 01/2022) (ABSOLAR, 2022b). A Figura 4 ilustra essa evolução.

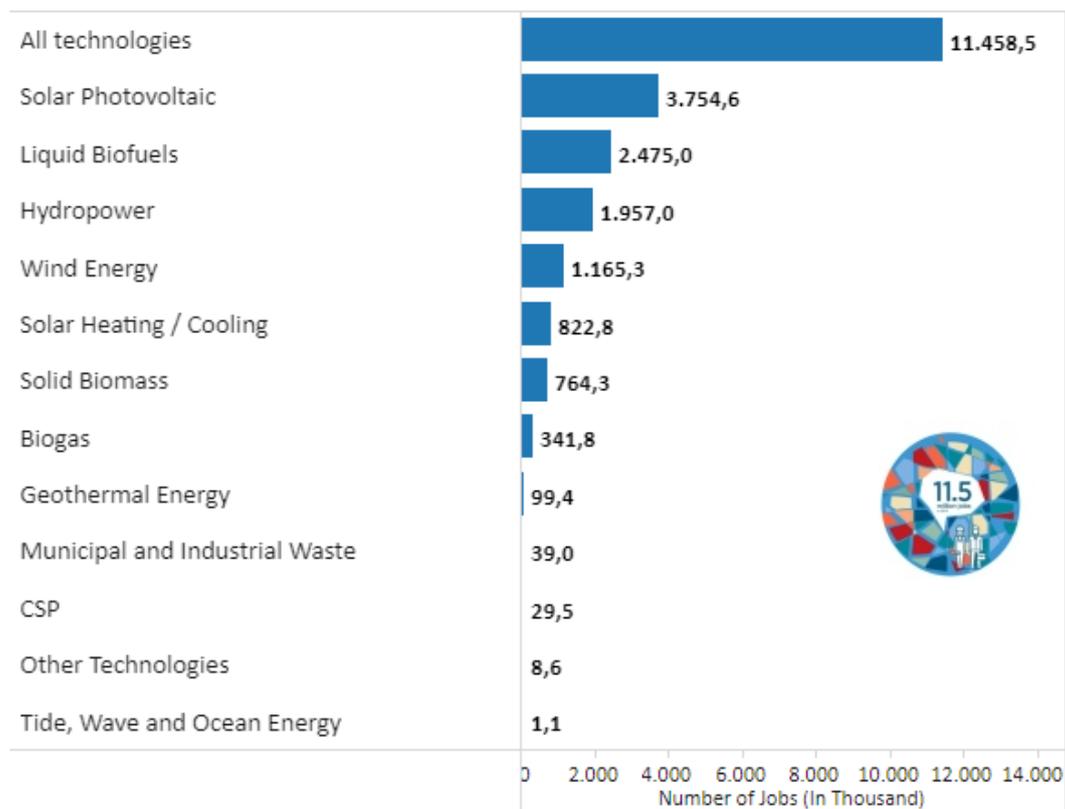
Figura 4: Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.



Fonte: ABSOLAR (2022b).

A Figura 5 expõe a quantidade de empregos gerados pelas fontes de energias renováveis no ano de 2019 no âmbito mundial, no qual a tecnologia solar fotovoltaica lidera o setor, provendo mais de três milhões setecentos e cinquenta e quatro mil trabalhos, o que representa 32,7 % do total de empregos gerados por fontes de energia renovável no mundo. No mesmo período, o Brasil registrou 43.200 empregos provenientes da energia solar fotovoltaica (IRENA, 2020b).

Figura 5: Quantidade de empregos por tecnologia de energia renovável no ano de 2019.



Fonte: IRENA (2020b).

Em 2022, é estimado que mais de 400 mil empregos sejam gerados por atividades relacionadas à energia solar fotovoltaica no Brasil, movimentando 72,3 bilhões de reais em novos investimentos privados (IRENA, 2020b).

## 2.2 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

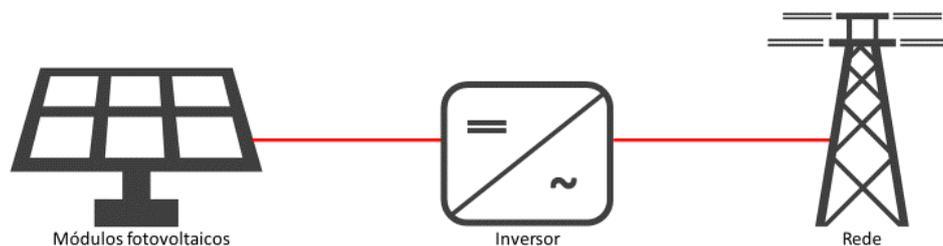
As tipologias mais difundidas de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica são: conectados à rede, autônomos, híbridos e flutuante, sendo as especificidades de cada um brevemente retratadas nos tópicos de 2.2.1 a 2.2.4, respectivamente. O tópico 2.2.3 descreve o modo de operação do sistema objeto da dissertação e o 2.2.4. apresenta uma revisão bibliográfica contemplando as principais instalações fotovoltaicas flutuantes no mundo.

### 2.2.1 Conectados à Rede (*on grid*)

As usinas conectadas a rede são subdivididas em projetos com até 5 MW (geração distribuída – GD) e projetos maiores que 5 MW (geração centralizada – GC).

Os projetos de GD geralmente são constituídos próximo a carga e integrados ao sistema de distribuição, sendo a energia produzida não destinada a uma carga definida, mas abastecendo uma unidade consumidora como todo e ainda, injetando a geração excedente no sistema de distribuição e obtendo créditos que permitem uma futura compensação da energia (MAHELA et al., 2017). É a modalidade de geração de energia solar fotovoltaica mais difundida na atualidade. Já os projetos centralizados são conectados a rede de transmissão tendo como característica principal estarem a grandes distâncias do centro de consumo (SANTOS, 2008). A Figura 6 representa de maneira simplificada os projetos fotovoltaicos conectados à rede.

Figura 6: Representação simplificada do sistema fotovoltaico conectado à rede.



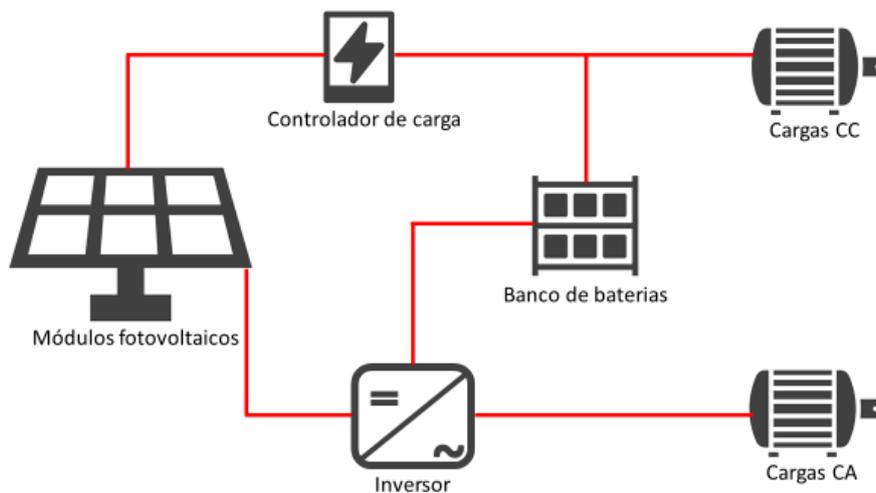
Fonte: adaptado de CRESESB (2014).

### 2.2.2 Autônomos (*off grid*)

Os sistemas fotovoltaicos autônomos não são conectados na rede de distribuição de energia elétrica. Dessa forma acumuladores, principalmente baterias, necessariamente são utilizados para armazenar a energia no período diurno (onde há a geração de energia solar) para distribuí-la em momentos em que não há geração, ou em que ela não seja suficiente para suprir a demanda por energia. Esse tipo de sistema geralmente é utilizado em locais remotos, onde não há a disponibilidade da rede de distribuição de energia. O seu dimensionamento deve ponderar uma autonomia para atender a carga mesmo em períodos de alta nebulosidade

(KARTHIKEYAN et al., 2017). Geralmente constitui uma configuração mais custosa, pelo fato de ter maior quantidade de componentes em sua constituição, principalmente as baterias ou equivalentes. A Figura 7 mostra o esquema simplificado de um desses arranjos.

Figura 7: Representação simplificada do sistema fotovoltaico Off Grid.

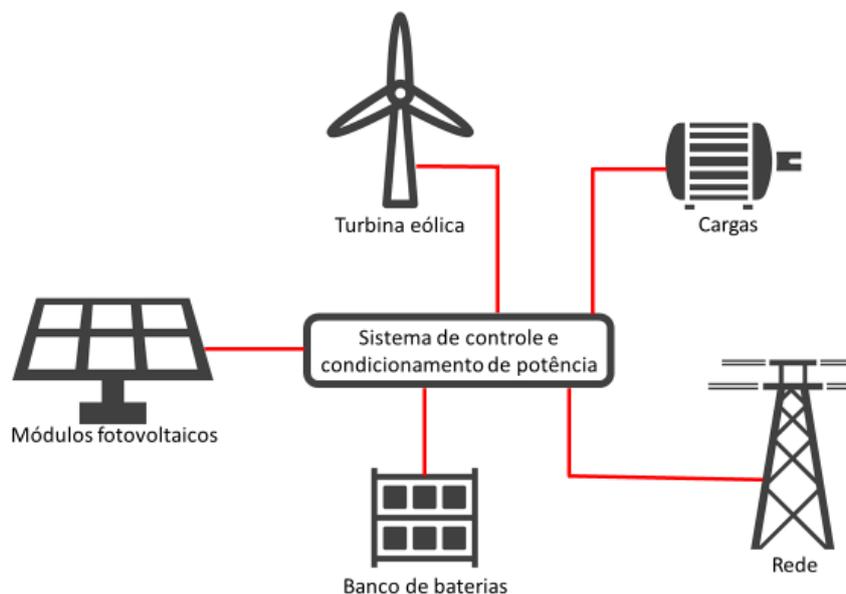


Fonte: adaptado de CRESESB (2014).

### 2.2.3 Híbridos

Esse tipo de solução integra mais de um tipo de fonte geradora de energia elétrica (como por exemplo, possuir a geração fotovoltaica e hidroelétrica no mesmo sistema), podendo possuir elementos de acumulação. Sua aplicação atual se dá em pontos específicos benéficos para as fontes geradoras escolhidas e tem como ponto de vantagem a minimização dos aspectos da intermitência atrelados às fontes de energia mencionadas. Contudo, são necessários diversos dispositivos de segurança e gerenciamento para resguardar o funcionamento do sistema, mantendo a qualidade da energia (BASARAN et al., 2017). A Figura 8 mostra um exemplo desses arranjos.

Figura 8: Representação simplificada de um sistema híbrido.



Fonte: adaptado de CRESESB (2014).

A configuração híbrida solar fotovoltaico flutuante com a hidroeletricidade é o modelo de operação do projeto piloto abordado nesse trabalho. O inversor fotovoltaico no sistema híbrido constitui parte do sistema de controle e condicionamento de potência, possuindo a mesma finalidade que nas demais aplicações (conversão da energia elétrica da forma contínua para alternada), contudo, na unidade de sistema de controle, tem-se também controladores de carga e equipamentos integrados aos demais componentes do sistema. Uma análise qualitativa, regulatória e comercial do hibridismo pode ser observada na nota técnica apresentada pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE (EPE, 2018).

#### 2.2.4 Gerador Fotovoltaico Flutuante

Embora a configuração solar fotovoltaica flutuante não suprima a vegetação, podem ser prejudiciais à fauna e flora do corpo d'água, devido à etapa de ancoragem (interferência local importante), sombreamento e estrutura de cabeamento. Também pode haver alteração na qualidade da água e aumento de sua turbidez, devido à diminuição da oxigenação da mesma, sendo sua disponibilidade comercial pouco estabelecida. Na etapa do transporte dos equipamentos para o local de instalação há emissão de exaustão dos maquinários, podendo haver derramamento acidental de óleo e ocasionar compactação e erosão do solo (PIMENTEL

DA SILVA et al., 2018). Também são possíveis alterações bióticas importantes devido ao sombreamento e menor oxigenação, introduzindo-se bioincrustações e outras alterações de flora e fauna aquáticas.

Por outro lado, abrangendo-se 25% da cobertura de reservatórios de hidroelétricas existentes, no contexto mundial, a geração de energia solar fotovoltaica flutuante possui capacidade de evitar cerca de 74 bilhões de m<sup>3</sup> de evaporação de água, que tem o potencial de adicionar cerca de 142,5 TWh para a produção de hidroeletricidade (FARFAN et al., 2018) e/ou aumentar a segurança do uso da água para abastecimento das populações. Outros impactos sociais, como a percepção humana sobre a poluição visual, atividades de recreação e turismo e o deslocamento de atividades pesqueiras, apesar de subjetivos, influem nesse tipo de sistema (PIMENTEL DA SILVA et al., 2018). A Tabela 2, em comparação com as usinas terrestres, salienta essas particularidades.

Tabela 2: Vantagens e desvantagens da energia solar fotovoltaica flutuante

<b>Aspecto</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Ambiental	Redução do uso de outros biomas	Redução da qualidade, aumento da turbidez e menor oxigenação da água Bioincrustação (impacto na fauna e flora aquática)
Energético	Maior potencial de geração [kWh/m <sup>2</sup> ] Integração com hidroelétricas (sistemas híbridos) Maior disponibilidade de água	Maior custo do investimento inicial Maior custo de O&M
Social	Reduz o uso de terras Maior disponibilidade de água	Poluição visual Deslocamento de atividades pesqueiras Atividades de recreação e turismo

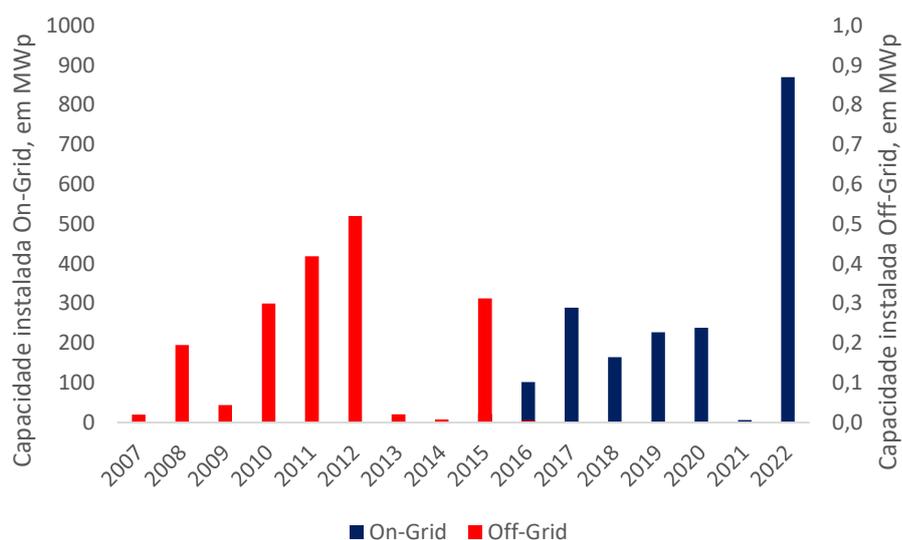
Fonte: elaboração própria.

Na atualidade, as usinas solares fotovoltaicas flutuantes operam de maneira análoga aos sistemas conectados, em que a principal distinção se dá por sua constituição ser em um corpo da água. De maneira vasta, a nota técnica da EPE (2020) elucida aspectos tecnológicos, técnicos, econômicos, ambientais e jurídicos.

Strangueto (2016) realizou uma revisão bibliográfica contemplando as principais instalações fotovoltaicas flutuantes instaladas no mundo até o ano de 2015, sendo que o presente trabalho atualiza esta pesquisa, apresentando as usinas em operação até fevereiro de 2022,

conforme apresentado no ANEXO A. A Figura 9 apresenta a evolução da capacidade instalada das usinas fotovoltaicas flutuantes catalogadas.

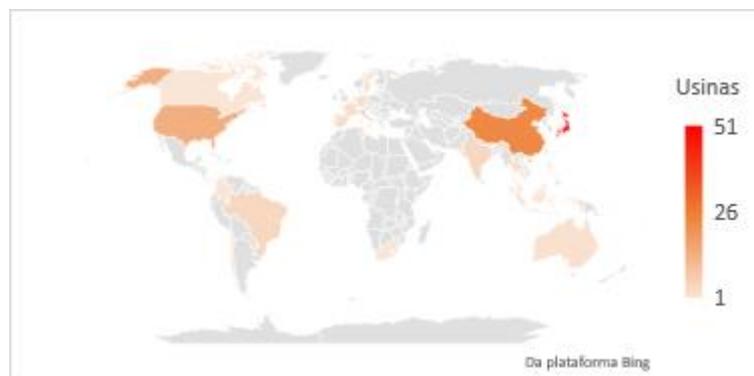
Figura 9: Capacidade instalada das usinas fotovoltaicas flutuantes catalogadas.



Fonte: elaboração própria.

Existe ainda uma grande escassez na disseminação da informação desse tipo de projeto, com poucas empresas e fabricantes que demonstram seu portfólio. O estudo lançado em janeiro de 2022 pela Global Industry Analysts – GIA, reportado pela revista PRNEWSWIRE (2022), aborda uma pesquisa com as principais empresas e fabricantes globais de equipamentos de sistema para energia solar fotovoltaica flutuante. O mercado estimado para a configuração é de 1.600 MWp em 2021, logo, para o mesmo período, a revisão apresentada contempla ao menos 65% das usinas em operação. Em comparação com as projeções apresentadas pela empresa de pesquisa GTM Reserch (2018), a revisão contida no trabalho abrange 70% das usinas. Atualmente, o país que possui a maior quantidade de usinas flutuantes é o Japão, com 51 empreendimentos, seguido da china com 21 e do Estados Unidos, com 14. O Brasil ocupa a 9º posição, com 4 empreendimentos em funcionamento. A Figura 10, mostra a concentração das usinas fotovoltaicas flutuantes por país no mundo. É possível notar que a maior concentração se situa no sudeste da Ásia; entretanto, a América do Norte também possui uma quantidade significativa de usinas.

Figura 10: Concentração das usinas fotovoltaicas flutuantes no mundo por país.



Fonte: elaboração própria.

Dentre os países com a maior capacidade instalada está a China com 1.640,29 MW<sub>P</sub>, seguido por Taiwan com 109,70 MW<sub>P</sub> e o Japão com 107,01 MW<sub>P</sub>. O Brasil se encontra na 12<sup>o</sup> posição com 1,65 MW<sub>P</sub> de capacidade instalada. Com relação a capacidade instalada das usinas fotovoltaicas flutuantes, observando a Figura 11, fica evidente a disparidade da China com relação aos demais países, já que sua capacidade instalada representa mais de 85 % do total mundial.

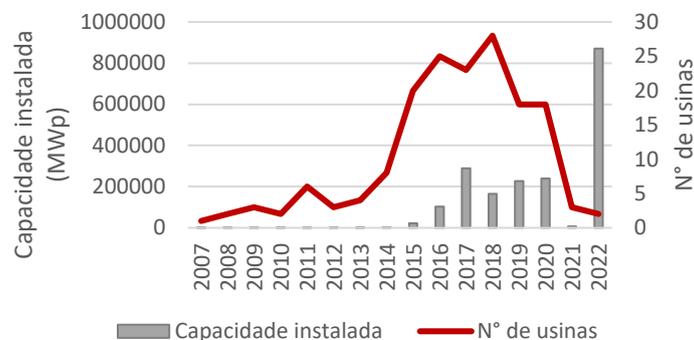
Figura 11: Capacidade das usinas fotovoltaicas flutuantes no mundo por país



Fonte: elaboração própria.

Com a Figura 12 é possível notar que, com o passar dos anos, estão se construindo empreendimentos com uma maior capacidade instalada e conectados à rede, uma vez que após o ano de 2016 não houve mais projetos desconectados. No ano de 2022, foram catalogadas 2 usinas na China, que juntas representam 45% da capacidade instalada de todo período (870 MW<sub>P</sub>).

Figura 12: Evolução da capacidade instalada de usinas fotovoltaicas flutuantes no mundo, por empreendimento.



Fonte: elaboração própria.

### 2.3.1 Influência da Temperatura

O silício é a tecnologia preponderante nos projetos de energia solar na atualidade e, dentre as características inerentes do seu funcionamento, está a perda da eficiência com o aumento da sua temperatura de operação, da ordem de 0,4 a 0,5 %/°C (EPE, 2020). Em virtude da temperatura de operação dos módulos instalados sobre um corpo d'água possuir a tendência de ser mais amena do que os projetos concebidos em solo, devido ao efeito de resfriamento evaporativo, são esperados se tenham um melhor desempenho para os projetos de geração solar flutuante.

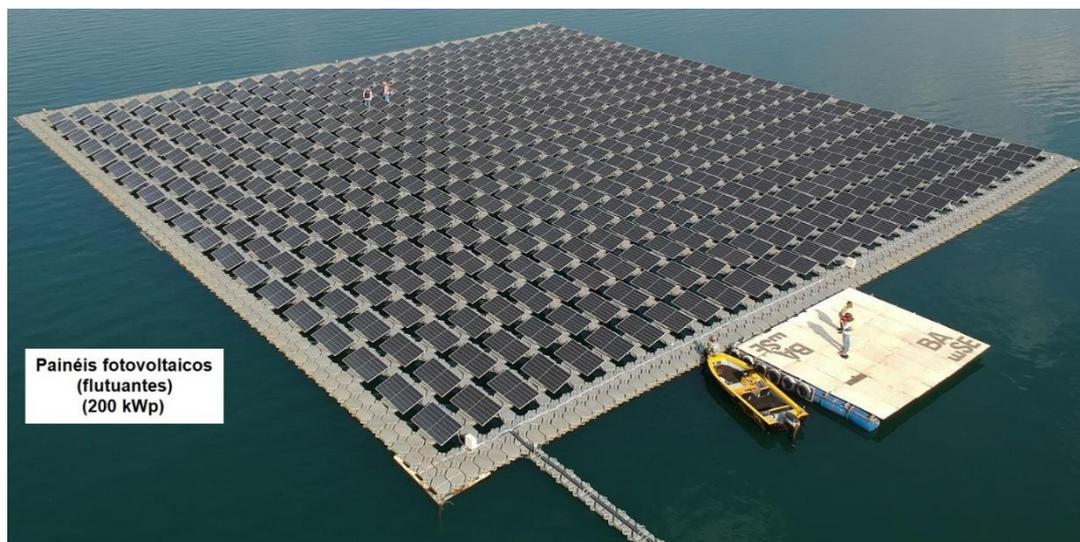
Em uma pesquisa elaborada em um lago, Alencar Filho (2018) demonstrou que a variação de temperatura entre um módulo fotovoltaico em estrutura flutuante e um em solo, na mesma região geográfica, no Ceará, pode chegar a 4 °C, acrescendo um ganho aproximado de 5 % na produção de energia. Em um estudo similar, Do Sacramento (2015) apresentou uma variação de até 10 °C, com o ganho de aproximadamente 11 %. Choi (2014) teve como resultado uma diminuição de até 10 °C na temperatura dos módulos no reservatório de uma hidroelétrica na Coreia, em momentos pontuais próximos ao meio-dia solar, resultando em um ganho de 11 % na produção. O modelo preditivo apresentado por Charles Lawrence Kamuyu (2018) mostrou uma diferença de até 2 °C nos módulos próximos da água, comparados aos terrestres, resultando em um incremento de 10 % na performance. A depender do clima da região da instalação, da estrutura e da flutuação, as temperaturas podem ser de 5 a 20 % menores (REC, 2018).

### 2.3.2 Caracterização da Usina Flutuante de Itumbiara (Go)

Diligenciar investimentos em projetos de inovação tecnológica é uma solução para minimizar custos futuros de equipamentos e maximizar a abrangência das energias renováveis (IRENA, 2020c). Nesse contexto, o programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL aloca recursos humanos e financeiros para o desenvolvimento do setor elétrico brasileiro (ANEEL, 2021).

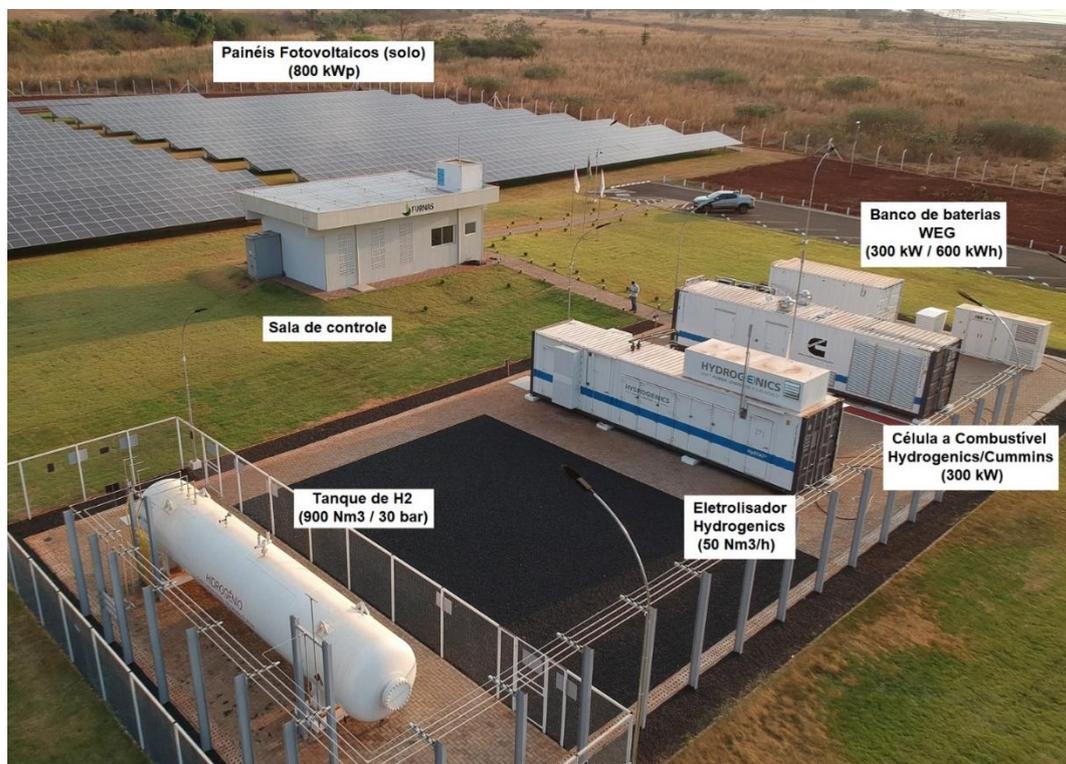
Fruto do programa, no rio Parnaíba, entre os municípios de Itumbiara, em Goiás, e Araporã, em Minas Gerais, uma USFF foi construída no lago do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itumbiara. O aparato experimental conta também com equipamentos de sistemas de armazenamento de energia elétrica, como baterias e um sistema de obtenção de hidrogênio por meio da eletrólise da água, além de uma usina fotovoltaica em solo, para efeito de comparação com a flutuante. Fazem parte das executoras do projeto a empresa Base - Energia Sustentável, a Universidade Estadual Paulista (Unesp), a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), a Universidade de Brandemburgo (Alemanha) e a empresa PV Solar (CANAL ENERGIA, 2020). As Figuras 13 e 14 mostram como o projeto está estabelecido.

Figura 13: Planta flutuante da UHE de Itumbiara



Fonte: elaboração própria.

Figura 14: Planta em solo e sistemas de armazenamento da UHE de Itumbiara



Fonte: elaboração própria.

O projeto foi concebido com o objetivo de estudar a inserção de armazenamento energia elétrica no Sistema Interligado Nacional – SIN (Chamada ANEEL nº 21/2016), otimizando a infraestrutura elétrica já consolidada das instalações da usina (subestações e linhas de transmissão), visando também a regulação dos parâmetros elétricos e aumento da confiabilidade do sistema (FURNAS, 2021). A Figura 15 apresenta um croqui de localização das plantas fotovoltaicas.

Figura 15: Croqui de localização das usinas fotovoltaicas de Furnas.



Fonte: elaboração própria através do Google Earth.

A título dessa dissertação, será analisado apenas o efeito da temperatura na usina solar fotovoltaica flutuante. A usina flutuante possui capacidade de 200,07 kW<sub>P</sub> (513 módulos Trina TSM390 de 390 W<sub>P</sub> cada) com 2 inversores SMA (modelo SHP75-10). A usina de solo é quatro vezes maior que da configuração em água com relação a potência instalada, contando com 2.052 módulos e 4 inversores, da mesma configuração dos instalados para a usina flutuante.

Um outro aspecto importante a ser caracterizado é o sistema de flutuação e ancoragem da planta, posto que o segmento de usinas fotovoltaicas flutuantes é relativamente recente e a amarração pode influenciar significativamente na produção de energia. Os flutuadores da usina de Furnas são oriundos de uma segunda geração de pesquisa e desenvolvimento de uma equipe multidisciplinar da empresa Base Energia em conjunto com a Furnas, sendo denominados do “tipo passarela” conforme observado na Figura 16.

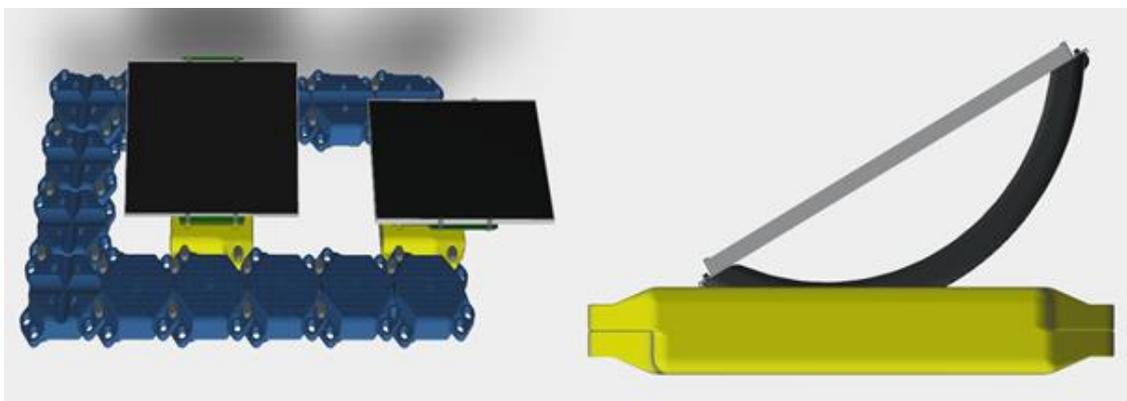
Figura 16: Flutuadores “tipo passarela” da UHE de Itumbiara.



Fonte: elaboração própria.

Os flutuadores são constituídos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), que é um plástico rígido, resistente à tração, tensão e compressão (GEDELPLASTICOS, 2021), com a viga de ancoragem em aço, tendo como virtudes ser de fácil montagem, com um formato modular e ângulo ajustável (Figura 17).

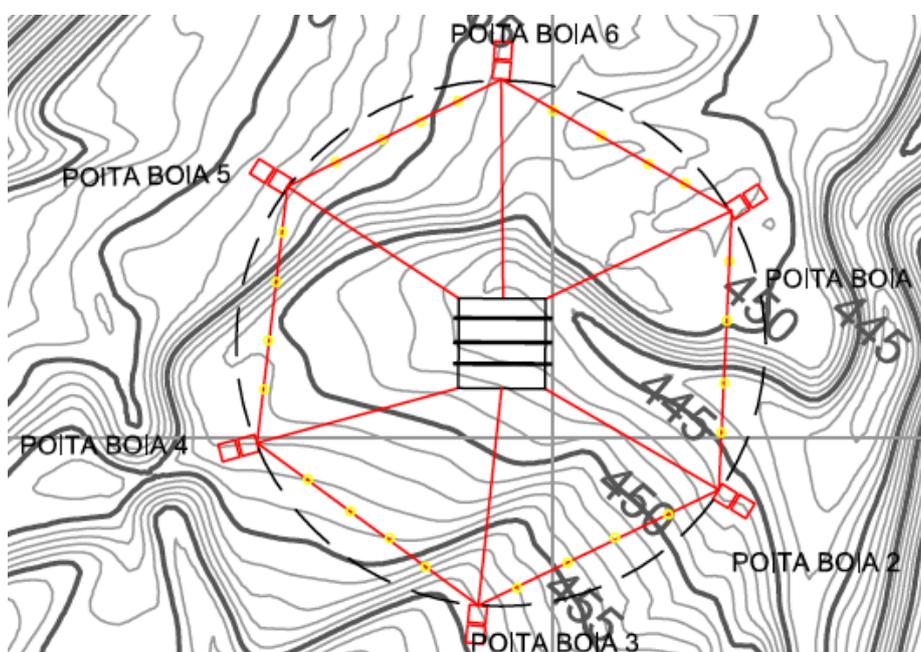
Figura 17: Sistema de flutuadores da usina de Furnas.



Fonte: elaboração própria.

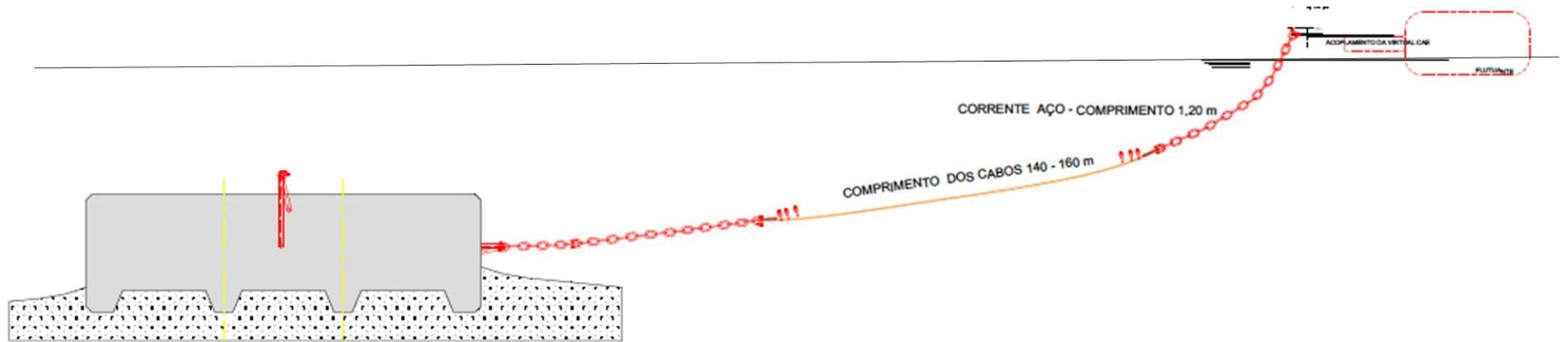
A grande extensão desprotegida (*fetch*) do reservatório de Itumbiara, foi considerada para concepção de um sistema não convencional de amarração. O reservatório possui uma zona de depleção de 25 m, com profundidade máxima de 45 m (ONS, 2022) e velocidade de ventos que podem chegar a 80 km/h. Considerando também a batimetria do reservatório e os esforços sobre a usina flutuante, foram adotadas seis âncoras (poitas) de concreto com lâminas de arrasto e amarras de polietileno, com o diâmetro de 30 mm (BASE; FURNAS, 2022). As Figuras 18 e 19 representam o sistema de ancoragem e amarração, respectivamente, da usina flutuante da UHE de Itumbiara.

Figura 18: Sistema de ancoragem da usina de Furnas.



Fonte: BASE; FURNAS, 2022.

Figura 19: Sistema de amarração da usina de Furnas.



Fonte: BASE; FURNAS, 2022.

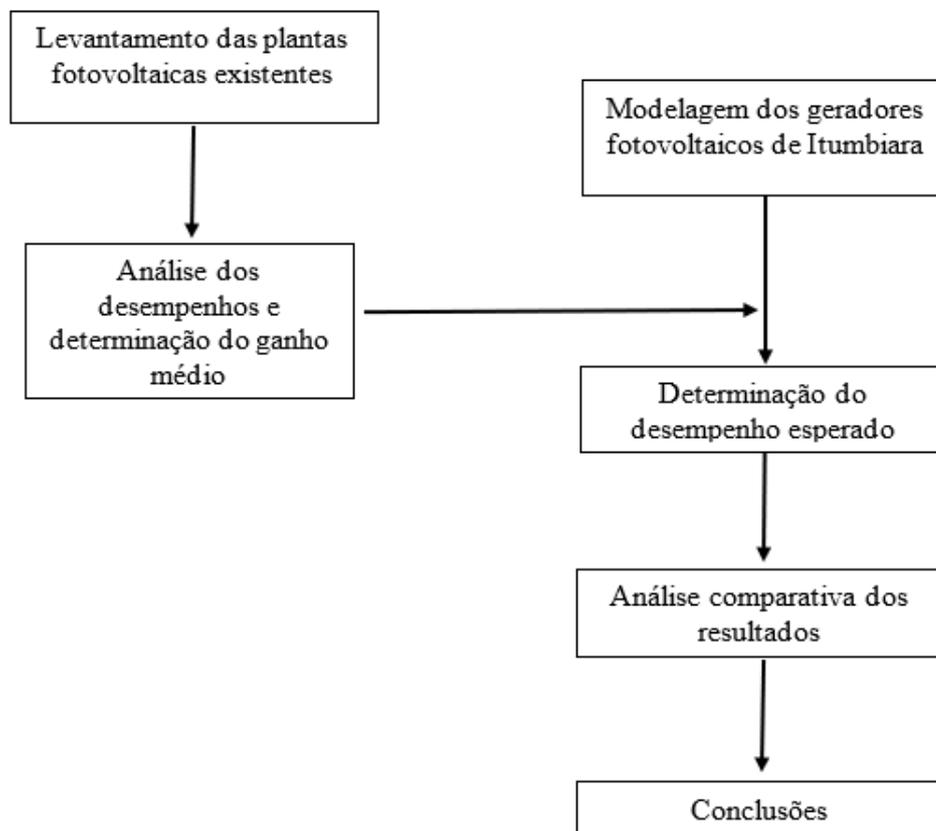
Com o aparato tecnológico de fixação é esperado que a usina possa se manter estável em meio às variações das condições hidrológicas inerentes ao período seco e úmido brasileiro. Ademais, o trabalho de Vo et al. (2021) apresenta uma revisão conceitual de diversos sistemas de flutuadores, ancoragem e amarração existentes na atualidade.

### 3 METODOLOGIA

A utilização de modelos computacionais ajuda na tomada de decisões sobre a construção e a estrutura de um sistema solar fotovoltaico, auxiliando também quanto à previsão do seu comportamento (STEIN; KLISE, 2009). Dentre os softwares com a aplicabilidade fotovoltaica mais utilizados na atualidade estão o PVSYST, PVSOL e o SAM (LALWANI et. al, 2010). As componentes que determinam o desempenho desses softwares são diversas, porém as condições climatológicas e a temperatura de operação dos módulos são determinantes (TINA et. al, 2021). Além disso, é imprescindível dominar os elementos tecnológicos e especificações técnicas ao se iniciar uma simulação, para obter o resultado mais assertivo (LAMERS et. al, 2018). Com relação aos aspectos supracitados, determinar o software e o modelo mais adequado para o contexto em que o gerador é inserido é o maior desafio (GU et. al, 2020). A utilização de softwares que permitam o ajuste dos modelos térmicos para considerar o efeito do resfriamento dos módulos, principalmente quando se trata dos sistemas fotovoltaicos flutuantes, é indispensável. Os softwares comerciais não se adequam para retratar o microclima gerado pela evaporação da água e, por consequência, não retratam a temperatura inferior à temperatura medida em um projeto em solo (TINA et. al, 2021). Posto isso, a modelagem do sistema fotovoltaico deve considerar um coeficiente de transferência de calor adequado para reproduzir o efeito da superfície aquática.

O fluxograma apresentado na Figura 20 apresenta de maneira simplificada a metodologia do presente trabalho.

Figura 20: Fluxograma sucinto da metodologia do trabalho.



Fonte: elaboração própria.

Inicialmente foi realizado um levantamento das plantas fotovoltaicas flutuantes existentes no mundo. O propósito dessa etapa foi verificar as particularidades dos projetos, a localidade de implementação e o crescimento da aplicação em número e escala. Com base em trabalhos da literatura, que comparam o desempenho de sistemas fotovoltaicos em solo e flutuantes em uma mesma localidade, foi determinado o ganho de desempenho médio dos sistemas flutuantes para conceber uma métrica de comparação. Fundamentado na pesquisa de Tina et. al (2021), utilizando o software PVSYS, que foi escolhido por permitir a alteração do coeficiente de troca de calor e apresentar boa precisão (Machado et al., 2020), os geradores de Itumbiara foram modelados com coeficientes de calor distintos. Assim, foi concretizada uma análise comparativa dos resultados ao defrontar os dados medidos com os dados simulados. Os tópicos de 3.1 a 3.6 retrataram de maneira mais ampla os processos determinantes para elaboração dessa dissertação.

### 3.1 Determinação do Potencial Solar Fotovoltaico Teórico

Diversos fatores influenciam a produção de energia elétrica através da tecnologia de energia solar fotovoltaica. De maneira geral, para estimar a eletricidade produzida por um gerador solar é necessário considerar a potência dos módulos fotovoltaicos, a irradiação solar do local de sua instalação e um coeficiente de desempenho que denota perdas do sistema. A Equação 1 estima, de maneira simplificada, a energia mensal fornecida por um gerador solar fotovoltaico.

$$E = Psit \times Irr \times PR \quad (1)$$

em que:

$E$  – energia produzida pelo gerador solar [kWh/mês];

$Psit$  – potência total do gerador solar fotovoltaico [ $kW_p$ ];

$Irr$  – irradiação solar média [kWh/m<sup>2</sup>.mês] (numericamente igual às horas de insolação equivalentes por mês);

$PR$  – coeficiente de desempenho [adimensional].

A potência dos módulos fotovoltaicos, dada em  $W_p$ , é medida em condições de teste padrão (STC — *Standard Test Conditions*), com uma irradiação de 1.000 W/m<sup>2</sup>, temperatura de 25 °C e espectro de massa de ar 1,5 (Dupré et al., 2018). A radiação solar é a energia emitida pelo sol e a irradiação é a propagação dessa energia sem um meio material. Para sua definição, geralmente é utilizado um banco de dados climatológicos, disponibilizado por bases de dados como o do *SunData* do CRESESB – Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito, ou softwares de simulação específicos (CRESESB, 2018). Dentre as variáveis que constituem o coeficiente de desempenho do sistema de geração solar fotovoltaica estão as perdas ôhmicas, por sombreamento, temperatura (efeito Joule), por sujidade, *mismatch* fotovoltaico e pela eficiência do inversor solar (SAEED; ZOHAIB, 2022).

### 3.2 Modelagem dos Geradores no PVSYST

Para realizar a modelagem dos geradores no software PVSYST, o trabalho de Tina et. al (2021) foi imprescindível. Os autores realizaram uma análise comparativa modificando o coeficiente de transferência de calor para um modelo térmico que representa o efeito do corpo da água e, conseqüentemente, da temperatura na produção de energia do gerador flutuante. Dentre os parâmetros utilizados, com base no trabalho de Tina et. al (2021), foi considerado o coeficiente de calor de 31,9 W/m<sup>2</sup>K e albedo de 0,1 para a usina flutuante e de 20 W/m<sup>2</sup>K e albedo de 0,2 para a usina de solo. Os demais critérios foram fundamentados nas especificações dos equipamentos que constituem o projeto. As especificações técnicas dos módulos utilizados no projeto são mostradas na Tabela 3 e as dos inversores na Tabela 4 e suas respectivas folhas de dados nos ANEXOS B e C, respectivamente.

Tabela 3: Especificações do módulo Trina Solar de 390 Wp.

<b>Elétricos (STC)</b>		<b>Temperatura</b>	
P <sub>max</sub>	390 Wp	P <sub>max</sub>	-0.37 % /°C
V <sub>mp</sub>	40,5 V		
I <sub>mp</sub>	9,64 A	V <sub>oc</sub>	-0.29 % /°C
V <sub>oc</sub>	49,7 V		
I <sub>sc</sub>	10,08 A	I <sub>sc</sub>	0.05 % /°C
η	19,9%		
T	-40°C ~ +85°C	NOCT	44 ± 2°C

Fonte: adaptado de TRINA, 2020.

Tabela 4: Especificações do inversor SMA de 75 kW.

Parâmetro técnico	Valor
Máxima potência (CC)	76.500 W
Máxima tensão de entrada	1.000 V
Máxima corrente de entrada	140 A
Máxima potência (CA)	75.000 W
Potência aparente (CA)	75.000 VA

Máxima tensão de saída	400 V
Máxima corrente de saída	109 A
Eficiência máxima	98,80%

Fonte: adaptado de SMA, 2019.

Os dados climatológicos da região de Itumbiara (latitude -18.4153°, longitude -49.1026°) foram retirados da base do MeteoNorm 8.0 e estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Dados climatológicos da região de Itumbiara.

	<b>Irradiação horizontal total</b>	<b>Irradiação difusa horizontal</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Velocidade do vento</b>	<b>Turvação de Linke</b>	<b>Humidade relativa</b>
	kWh/m <sup>2</sup> .mês	kWh/m <sup>2</sup> .mês	°C	m/s	[-]	%
Janeiro	199,8	88,7	23,3	2,50	3,206	75,0
Fevereiro	162,9	66,9	23,2	2,41	3,246	75,2
Março	174,8	70,5	23,0	2,30	3,213	77,8
Abril	156,2	52,8	22,4	2,30	3,043	75,8
Maió	146,2	49,7	21,2	2,20	2,927	70,1
Junho	136,8	34,2	19,5	2,20	2,907	68,2
Julho	146,5	36,7	19,6	2,49	3,041	60,2
Agosto	168,1	47,4	21,3	2,70	3,307	52,0
Setembro	176,1	59,2	23,0	2,81	4,494	52,6
Outubro	198,3	74,1	24,2	2,69	3,853	59,7
Novembro	178,1	83,5	22,8	2,59	3,338	76,0
Dezembro	177,2	86,0	23,2	2,50	3,306	77,1
<b>Ano</b>	<b>2021,0</b>	<b>749,7</b>	<b>22,2</b>	<b>2,47</b>	<b>3,323</b>	<b>68,3</b>

Fonte: elaboração própria através do PVSYSY (base de dados MeteoNorm 8.0).

As perdas consideradas na simulação estão apresentadas Tabela 6, esses parâmetros foram escolhidos por serem a definição padrão do software PVSYSY. As demais condições do software não foram alteradas. Perdas por sombreamento foram desconsideradas pois no

regimento do projeto as mesas foram construídas de modo a não sombrear as demais em ambas as configurações.

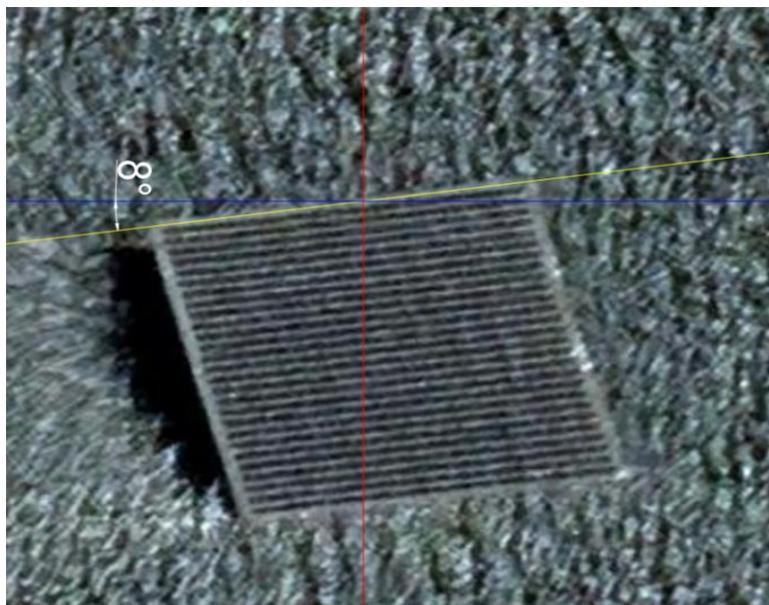
Tabela 6: Parâmetros de perdas no âmbito fotovoltaico.

Perdas	Valor
Ôhmicas	1,5%
Indisponibilidade do sistema	2,0% -7,3 dias/ano
Sujidade	3,0%
Potência no MPPT	2,0%
Fator LID	2,0%

Fonte: elaboração *própria* através do PVSYST.

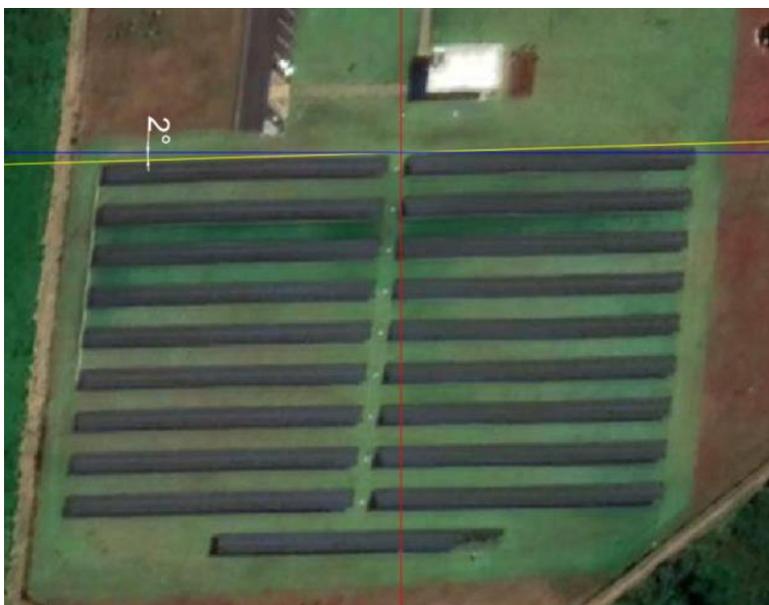
Em vista da indisponibilidade do ângulo azimutal das plantas fotovoltaicas (projeção solar com a direção norte geográfica), foi realizada uma estimativa com auxílio dos softwares Google Earth e do AutoCAD e considerados nesse trabalho como hipóteses. Recortou-se as imagens das usinas com o enquadramento para o norte geográfico (linha em vermelho). Em seguida, uma linha amarela foi sobreposta à borda da mesa inicial das usinas e outra em azul foi elaborada de modo perpendicular a linha do norte sendo aferido o ângulo entre essas duas últimas (ângulo do azimute). Os ângulos aferidos da usina flutuante e de solo são apresentados nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Figura 21: Estimativa do ângulo azimutal da usina flutuante.



Fonte: elaboração *própria* através do AutoCAD e Google Earth.

Figura 22: Estimativa do ângulo azimutal da usina de solo.

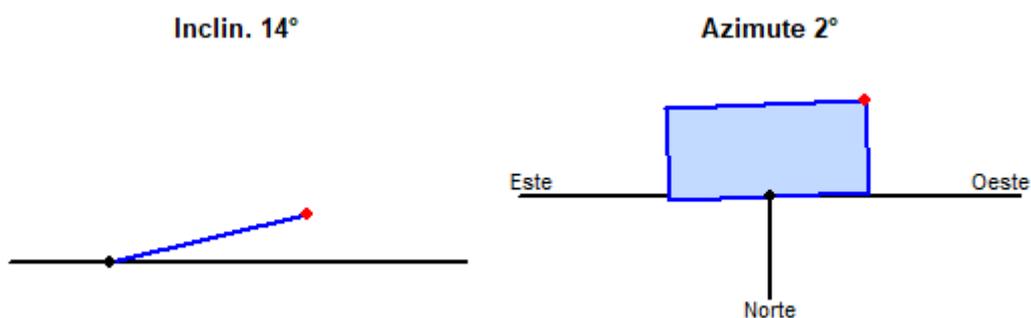


Fonte: elaboração *própria* através do AutoCAD e Google Earth.

A inclinação dos módulos foi constatada no local da instalação e a medição mostrou que os constituídos em solo estão estabelecidos com  $14^\circ$  e os flutuantes com  $22^\circ$ . A partir disso, os

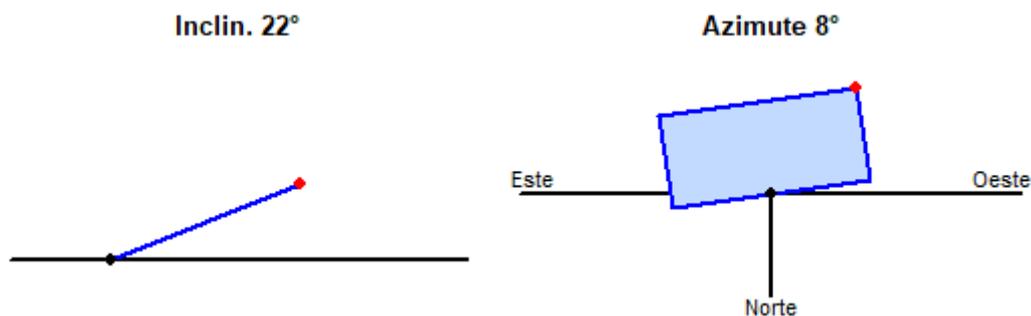
dados foram inseridos no PVSYST, conforme mencionado e representado pela Figura 23 para usina de solo e a Figura 24 para flutuante.

Figura 23: Inclinação do plano e azimute para usina de solo.



Fonte: elaboração *própria* através do PVSYST.

Figura 24: Inclinação do plano e azimute para usina flutuante.



Fonte: elaboração *própria* através do PVSYST.

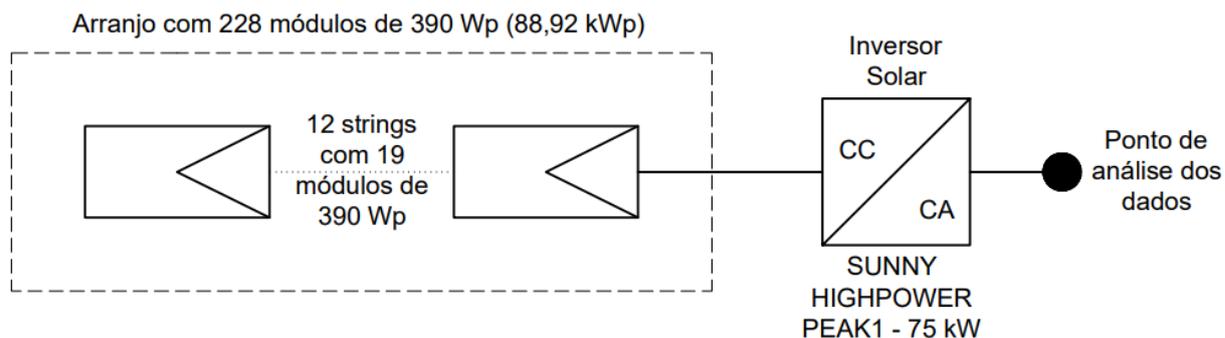
Os resultados obtidos foram comparados com os dados de geração coletados da memória de massa de um inversor de cada uma das usinas.

### 3.3 Coleta e Processamento dos Dados

Os dados de geração solar foram extraídos diretamente da memória de massa de um exemplar do inversor solar da usina flutuante e outro da usina de solo e analisados sobre a ótica da produção de energia ativa. O arranjo fotovoltaico da usina solo se difere do da flutuante, sendo que a flutuante tem o arranjo formado por doze *strings* de dezenove módulos, conforme

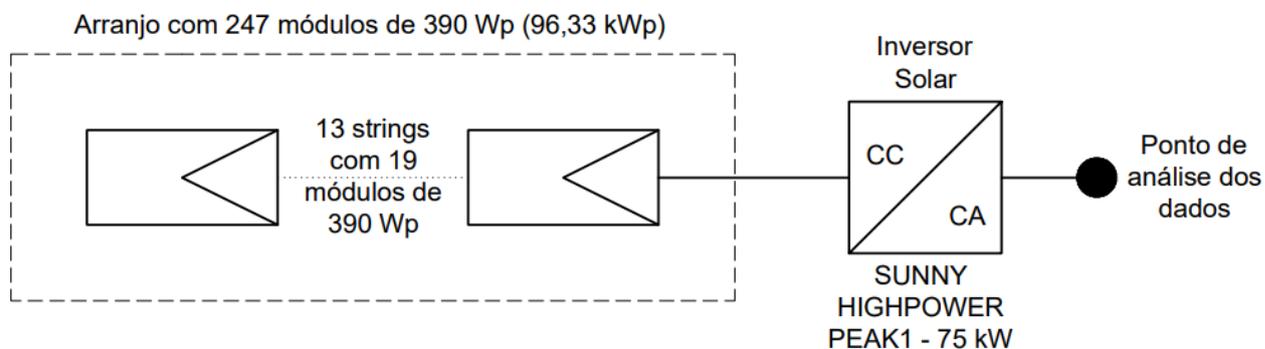
ilustra a Figura 25. Já o arranjo da usina flutuante é formado por treze *strings* de dezenove módulos, conforme ilustra a Figura 26.

Figura 25: Arranjo fotovoltaico do inversor analisado da planta flutuante da usina de Itumbiara.



Fonte: elaboração própria através do AutoCad.

Figura 26: Arranjo fotovoltaico do inversor analisado da planta de solo da usina de Itumbiara.



Fonte: elaboração própria através do AutoCad.

A etapa de processamento se consistiu na ordenação do banco de dados bruto, do tipo CSV – *Comma Separated Values*.

Tabela 7: Exemplificação do banco de dados bruto.

Data, Potência ativa, Corrente DC, Potência DC, Tensão DC
31/05/22 23:59,"0.00 W","0.03 A","10.00 W","182.30 V"
31/05/22 23:58,"0.00 W","0.03 A","10.00 W","182.30 V"
31/05/22 23:57,"0.00 W","0.03 A","10.00 W","182.30 V"

31/05/22 23:56,"0.00 W","0.03 A","10.00 W","182.30 V"
31/05/22 23:55,"0.00 W","0.03 A","10.00 W","182.60 V"
31/05/22 23:54,"0.00 W","0.03 A","10.00 W","182.60 V"
31/05/22 23:53,"0.00 W","0.03 A","10.00 W","182.60 V"

Fonte: elaboração própria.

As variáveis foram separadas por coluna e os dados horários corrigidos do horário de Brasília para o horário de Itumbiara, que são destoantes em 7 minutos. Além disso, foi estruturado uma base de análise a nível diário, para permitir a comparação em base comum, que será discutida no tópico subsequente. A Tabela 8 demonstra de maneira simplificada o banco de dados após a etapa de estruturação.

Tabela 8: Exemplificação do banco de dados estruturado.

<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>Potência ativa (W)</b>	<b>Corrente DC (A)</b>	<b>Potência DC (W)</b>	<b>Tensão DC (V)</b>
31/05/2022	17:53:00	10,00	0,18	110	551,89
31/05/2022	17:52:00	30,00	0,20	110	551,89
31/05/2022	17:51:00	30,00	0,20	110	551,89
31/05/2022	17:50:00	38,33	0,20	110	551,89
31/05/2022	17:49:00	40,00	0,20	110	551,89
31/05/2022	17:48:00	43,33	0,20	125	551,92
31/05/2022	17:47:00	50,00	0,31	170	552,00
31/05/2022	17:46:00	51,66	0,31	170	552,00
31/05/2022	17:45:00	70,00	0,31	170	552,00

Fonte: elaboração própria.

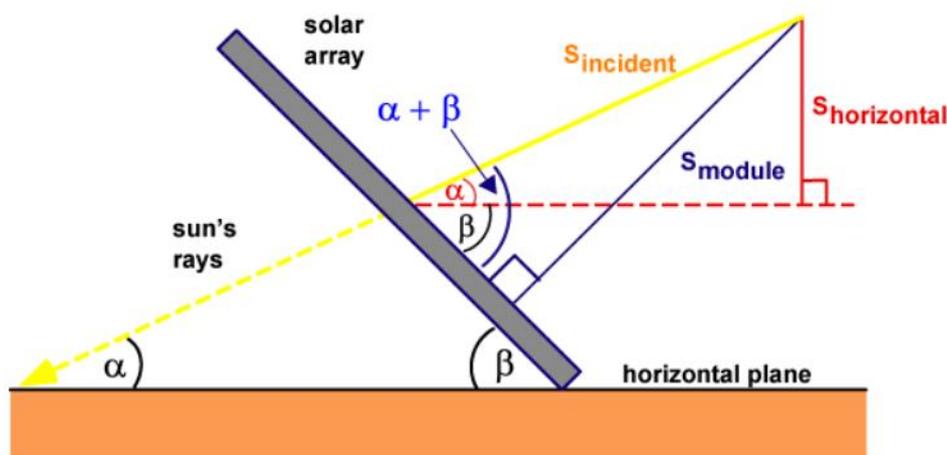
### 3.4 Comparação em uma Base Comum

Como relatado no tópico 3.2, as plantas fotovoltaicas instaladas em solo e flutuante ficaram com inclinações diferentes, a primeira com 14 graus e a segunda com 22 graus. Essa diferença impede que se compare, de forma direta, as energias produzidas diariamente por

ambos os arranjos. Portanto, é necessário se estabelecer um procedimento que permita converter essas inclinações em um valor padrão, de forma a possibilitar cálculos e comparações em uma base comum.

A conversão exata desses dados não é simples, exigindo alguns cálculos envolvendo o uso de variáveis, além do ângulo de inclinação ( $\beta$ ) de cada arranjo, como a latitude do local ( $\phi$ ) e a declinação solar no dia das medidas ( $\delta$ ), sendo a data, cujos dados estão sob análise, convertida no número do dia do ano ( $d$ ), partindo-se de primeiro de janeiro (dia 1), até 31 de dezembro (dia 365). As grandezas estão mostradas na Figura 27 em relação à horizontal e as equações utilizadas nos cálculos estão indicadas a seguir.

Figura 27: Representação esquemática dos ângulos e parâmetros envolvidos na inclinação de um plano sob radiação solar em relação à horizontal.



Fonte: HONSBURG; BOWDEN, 2019.

Em que:

$S_{incident}$ : radiação incidente na superfície do módulo, que forma um ângulo  $\alpha$  com o plano horizontal.

$S_{horizontal}$ : componente horizontal da radiação incidente, que é medida no plano horizontal.

$S_{module}$ : componente da radiação incidente perpendicular ao módulo, responsável efetiva pela energia produzida pelo módulo.

Portanto:

$$S_{horizontal} = S_{incident} \cdot \text{sen} \alpha \quad (2)$$

$$S_{module} = S_{incident} \cdot \text{sen}(\alpha + \beta) = S_{horizontal} \cdot \frac{\text{sen}(\alpha + \beta)}{\text{sen}\alpha} \quad (3)$$

$$\alpha = 90 - \beta + \delta \quad (4)$$

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} \left[ \frac{360}{365} \cdot (284 + d) \right] \quad (5)$$

Considerando-se uma conversão dos dados em solo para a inclinação de 22 graus, tem-se:

$$S_{solo}(14) = S_{horizontal} \cdot \frac{\text{sen}(\alpha + 14)}{\text{sen}\alpha} \quad (6)$$

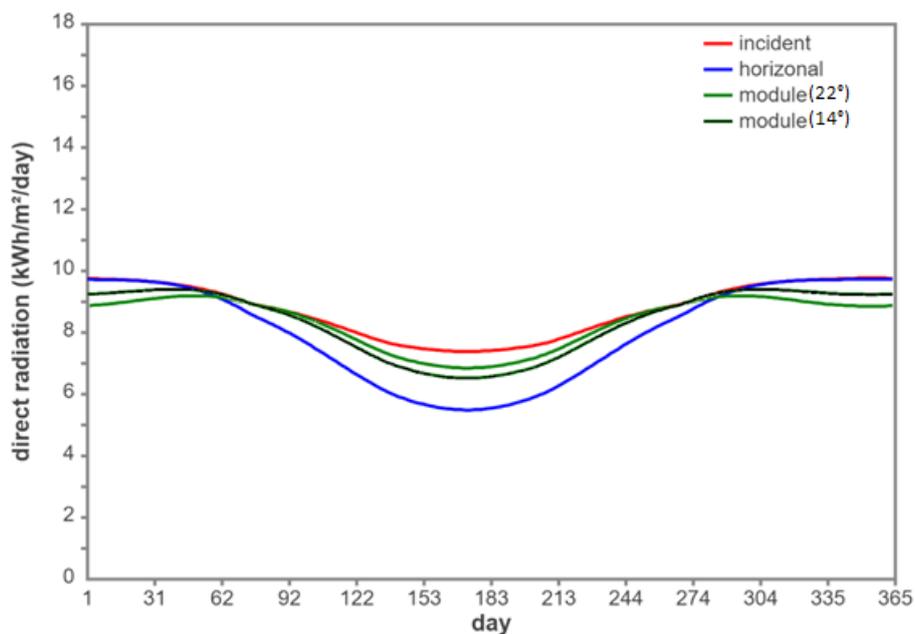
$$S_{solo}(22) = S_{horizontal} \cdot \frac{\text{sen}(\alpha + 22)}{\text{sen}\alpha} \quad (7)$$

Portanto,

$$S_{solo}(22) = S_{solo}(14) \cdot \frac{\text{sen}(\alpha + 22)}{\text{sen}(\alpha + 14)} \quad (8)$$

Essa conversão deve ser feita para cada dia de medições, para o qual determina-se o dia do ano (d) e, conseqüentemente, a declinação solar desse dia ( $\delta$ ). Dessa forma, a partir da latitude local ( $\phi = 18,423611^\circ$ ) calcula-se o ângulo  $\alpha$  desse dia. Considerando-se que os maiores valores de irradiação são obtidos quando o ângulo de inclinação dos painéis se aproxima da latitude local, a produção de energia elétrica a 22 graus será maior na maioria dos dias do ano, em relação à inclinação de 14 graus, conforme mostrado na Figura 29. Pode-se observar que a curva dos módulos a 22 graus é superior à de 14 graus aproximadamente entre os dias 60 e 280, ou seja, em cerca de 220 dias no ano (60 % dos dias).

Figura 28: Simulação computacional para irradiações incidente, horizontais e nas inclinações de 22 e 14 graus.



Fonte: HONSBURG; BOWDEN, 2019.

### 3.5 Base Dados Climatológicos

Para realizar uma aferição dos dados gerados de modo horário, agregando as variáveis de temperatura ambiente e a velocidade do vento, foi utilizado o banco de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), considerando a sua estação meteorológica automática ITUMBIARA – GO [A035] (INMET, 2022). A estação climatológica de Itumbiara fica aproximadamente a 10 km de distância das usinas fotovoltaicas.

### 3.6 Indicadores de Desempenho dos Sistemas Fotovoltaicos

Para verificar a otimização dos sistemas fotovoltaicos de solo e flutuante, e posteriormente comparar a sua performance, foram utilizados dois indicadores: a energia normalizada (EN) e o coeficiente de performance (PR).

A energia normalizada é a razão da quantidade de energia elétrica em corrente alternada produzida pelo sistema ( $EP$ , em kWh) e a potência nominal do sistema fotovoltaico ( $PN$ , em  $kW_P$ ) (ALMEIDA, 2012; DE PAULA et al., 2022).

$$EN = \frac{EP}{PN} \quad (9)$$

Esse indicador permite a comparação de sistemas fotovoltaicos com arranjos distintos, como é o caso dos sistemas da usina de Furnas, sendo normalizada a produção de energia em relação à sua potência nominal, mensurando a produção de energia equivalente em intervalos de tempos mensais ou anuais (DE PAULA et al., 2022).

O coeficiente de performance é um valor adimensional que considera o efeito global das perdas nos sistemas fotovoltaicos, possibilitando analisar o desempenho de sistemas fotovoltaicos independentemente da sua inclinação e orientação, normalizando a produção de energia do gerador em relação a radiação (DE PAULA et al., 2022). A Equação (10) apresenta essa relação:

$$PR = \frac{EP}{EPn} \quad (10)$$

em que:

$EPn$  – energia produzida nominal (kWh).

### 3.7 Sobredimensionamento de Módulos Fotovoltaicos (*oversizing*)

A determinação do dimensionamento dos componentes de um sistema solar fotovoltaico deve considerar, principalmente, a relação entre a potência dos módulos fotovoltaicos e do inversor (TAHA, 1995). Conhecido os limites operacionais do inversor se faz necessário uma otimização da quantidade e potência dos módulos para otimização da produção de energia elétrica e redução de LCOE do projeto. A relação entre a potência dos módulos e a potência do inversor (*oversizing*) é expressa pela Equação 11.

$$Ov = \frac{Pmód.}{Pinv.} \quad (11)$$

em que:

*Ov* – sobredimensionamento dos módulos, *oversizing* (%);

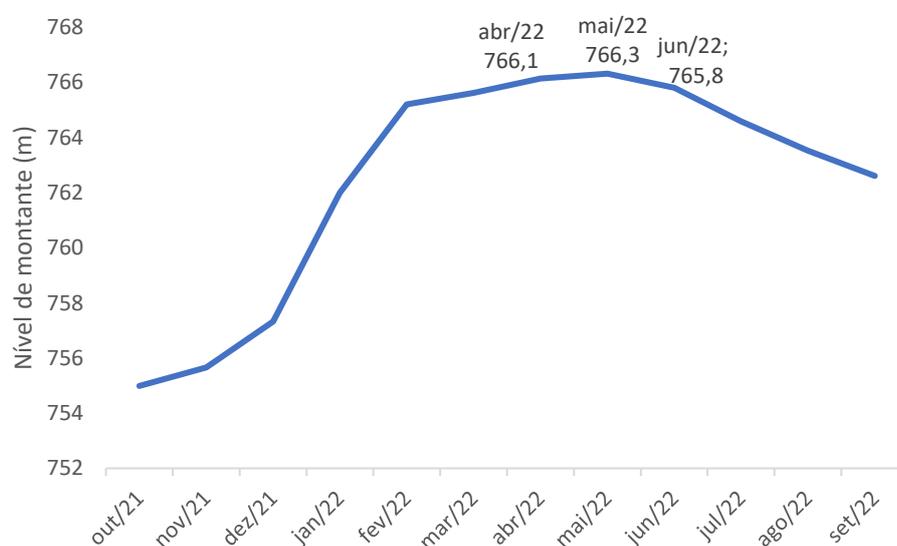
*Pmód.* – potência dos módulos (kW<sub>p</sub>);

*Pinv.* – potência do inversor (kW).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados com destaque para o período de maio de 2022, pois nesse intervalo a estrutura de flutuação da usina flutuante apresentou uma maior estabilidade, possibilitando coletar os dados de geração de energia para todo o mês de maio de 2022. Isto, devido ao fato do nível de montante do reservatório da hidroelétrica de Itumbiara ter apresentado uma menor variação no período (0,3 m de abril/22 para maio/22 e 0,5 m de maio/22 para junho/22), conforme mostrado na Figura 29, o que minimiza qualquer interferência do sistema de ancoragem, amarração e flutuação, que possui caráter experimental, isolando ao máximo o objetivo da dissertação, que é a avaliação do impacto da temperatura no desempenho da usina flutuante.

Figura 29: Dados hidrológicos do reservatório da UHE de Itumbiara.



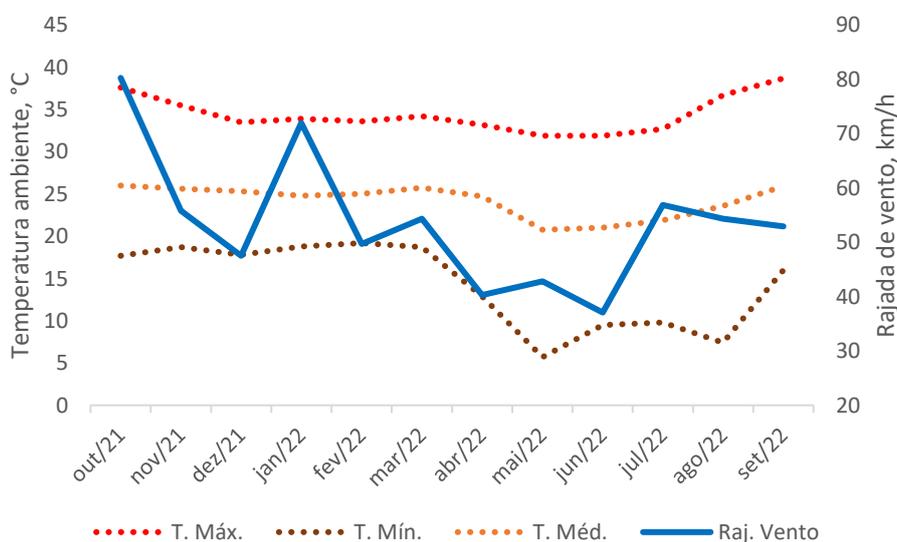
Fonte: elaboração própria através do ONS, 2022.

Segundo Catena et al. (2018), em se tratando da aplicação de módulos fotovoltaicos convencionais para a aplicação flutuante, o albedo possui pouca representatividade nos resultados. Além disso, o efeito das ondas e do vento na superfície da água podem alterar a disposição dos flutuadores e da reflexividade da água (Tina et al., 2018). O impacto da variação da inclinação promovida por uma onda depende do tipo de estrutura do flutuador

(CAZZANIGA, 2020) e a performance da usina flutuante é diretamente afetada pela passagem de ondas, devido a alterações nas variáveis geométricas (inclinação e o ângulo azimutal) (WHITTAKER, et al., 2020) refletindo em uma diferença de irradiação entre os módulos de uma mesma *string*.

As usinas flutuantes geralmente são instaladas em bacias em que as condições de incidência de vento são favoráveis (TINA et al., 2021). Entretanto, segundo os dados apresentados pelo INMET, a velocidade das rajadas de vento na cidade de Itumbiara pode chegar a 80 km/h (INMET, 2022). Em vista disso, o mês de maio também apresentou a terceira menor ocorrência de rajadas, com 42,8 km/h (valor máximo mensal) ficando acima apenas dos meses de junho de 2022, com 37,1 km/h e abril de 2022, com 40,3 km/h. A amplitude da variação da temperatura ambiente para o mês de maio de 2022 também foi a maior presente no cenário dos doze últimos meses. Todos as condições supracitadas convergem para que o mês de maio de 2022 seja oportuno para a análise da influência da temperatura nas usinas flutuantes de Itumbiara. A Figura 30 apresenta os dados de temperatura ambiente e das rajadas do vento na cidade de Itumbiara-GO.

Figura 30: Temperatura ambiente e rajadas de vento na cidade de Itumbiara-GO.

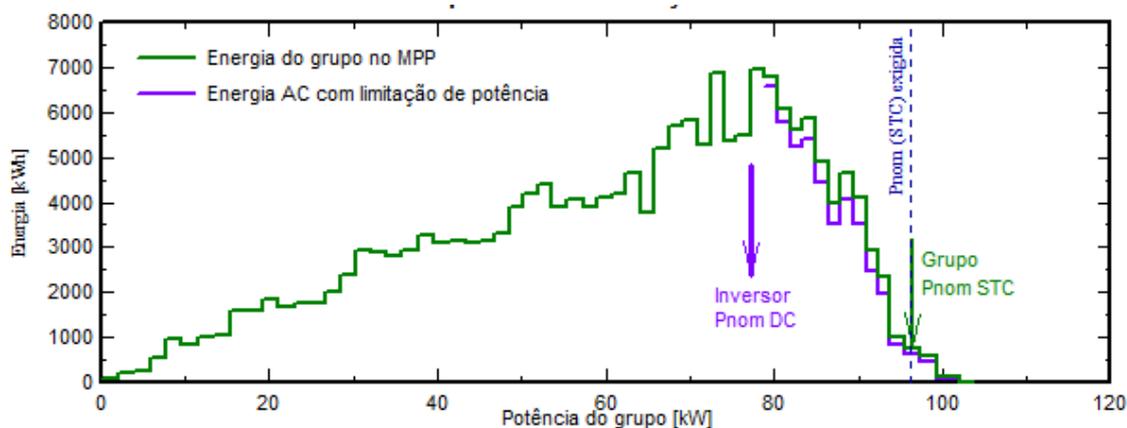


Fonte: elaboração própria através do INMET, 2022.

Após a realização da simulação no PVSyst, conforme os parâmetros e hipóteses indicados na metodologia, foi obtido o resultado das perdas devido à sobrecarga do inversor fotovoltaico

na configuração de solo, representado uma limitação de 2,5 % por conta do *oversizing* de aproximadamente 128 %, conforme demonstra a Figura 31.

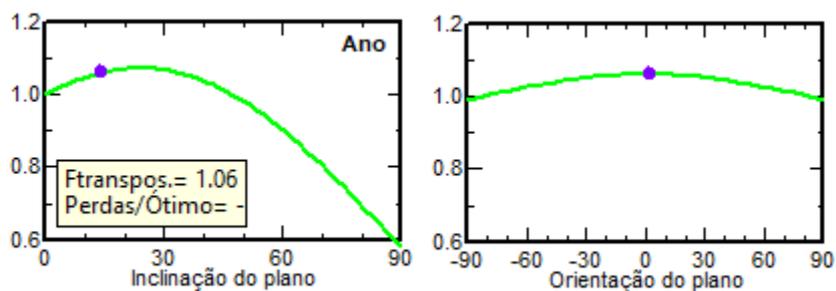
Figura 31: Distribuição de potência na saída do inversor (CA), usina de solo.



Fonte: elaboração *própria* através do PVSYST.

O fator de transposição obtido, de 1,06, representa uma perda em relação ao posicionamento ótimo (azimute de  $0^\circ$  e orientação próxima a latitude) de -1,1 % e uma irradiação global no plano dos módulos de 2.143 kWh/m<sup>2</sup>, conforme demonstra a Figura 32.

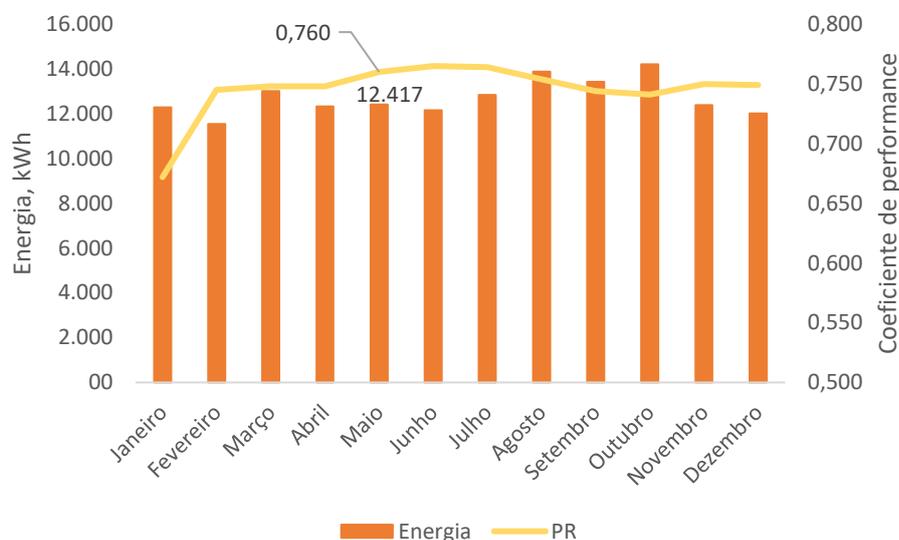
Figura 32: Perdas devido ao posicionamento dos módulos da usina de solo.



Fonte: elaboração *própria* através do PVSYST.

Com isso, a geração de energia esperada para a usina de solo é 152.515 kWh no ano de 2022, com um coeficiente de performance (PR) médio de 0,745. Para o mês de maio de 2022, em específico, é prevista a produção de 12.417 kWh com o PR de 0,760. A Figura 33 apresenta os dados de geração esperados de 2022 para essa configuração.

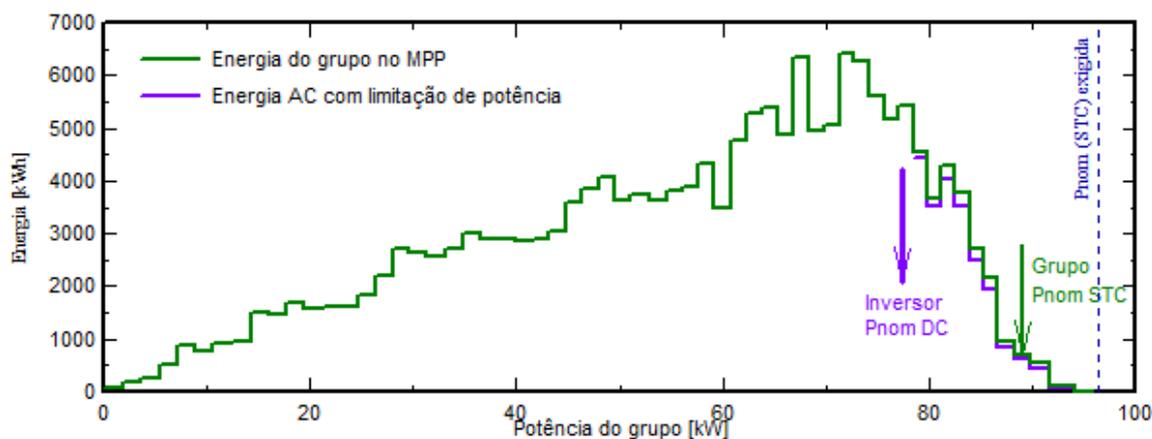
Figura 33: Previsão de geração de energia da usina de solo.



Fonte: elaboração própria através do PVSYSY.

Foi obtido uma limitação das perdas devido à sobrecarga do inversor fotovoltaico na configuração flutuante de 0,8 % por conta do *oversizing* de aproximadamente 119 %. A Figura 34 demonstra o resultado das perdas devido à sobrecarga do inversor fotovoltaico na configuração flutuante.

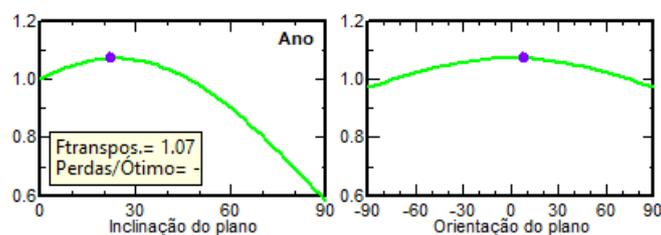
Figura 34: Distribuição de potência na saída do inversor (CA), usina flutuante.



Fonte: elaboração própria através do PVSYSY.

As perdas devido aos parâmetros de campo da usina de flutuante são representadas na Figura 35.

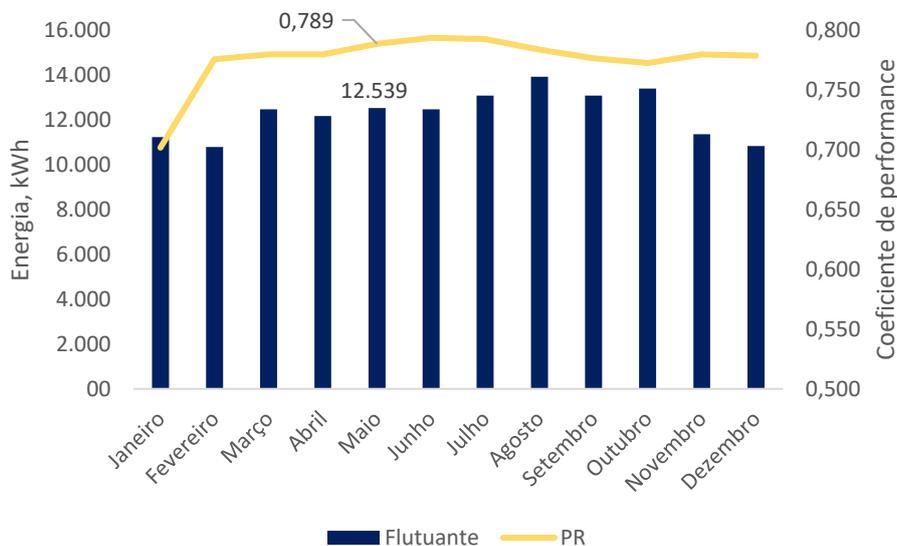
Figura 35: Perdas devido ao posicionamento dos módulos da usina flutuante.



Fonte: elaboração própria através do PVSYST.

O fator de transposição de 1,07 representado uma perda em relação ao posicionamento ótimo foi de -0,1 % e uma irradiação global no plano dos módulos de 2.163 kWh/m<sup>2</sup>. Ademais, para a usina de flutuante foi prevista a geração de 147.503 kWh no ano de 2022, com um coeficiente de performance (PR) médio de 0,776. Para o mês de maio de 2022, em específico, é esperada a produção de 12.539 kWh com o PR de 0,789.

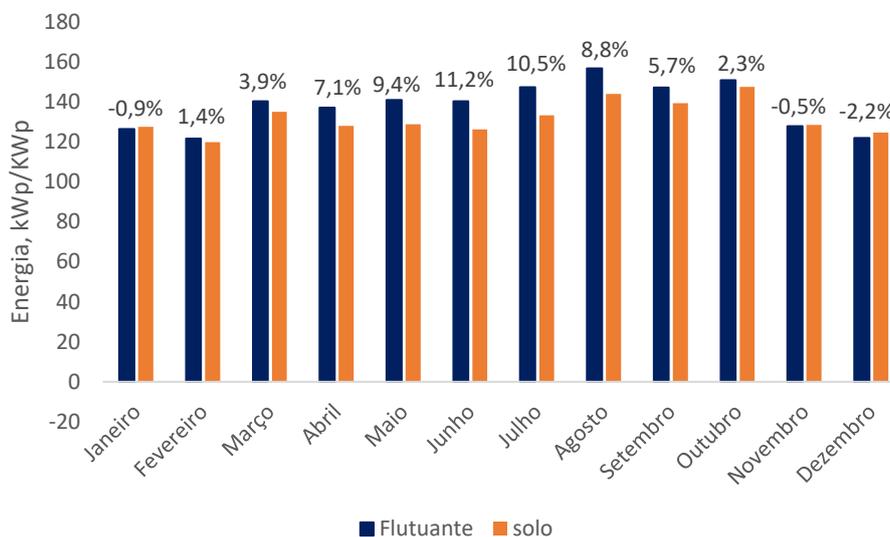
Figura 36: Previsão de geração de energia da usina flutuante.



Fonte: elaboração própria através do PVSYST.

Devido a diferença entre a quantidade de módulos entre os arranjos das plantas, foi calculado a produção de energia normalizada (kWh/kWp), conforme apresenta a Figura 37.

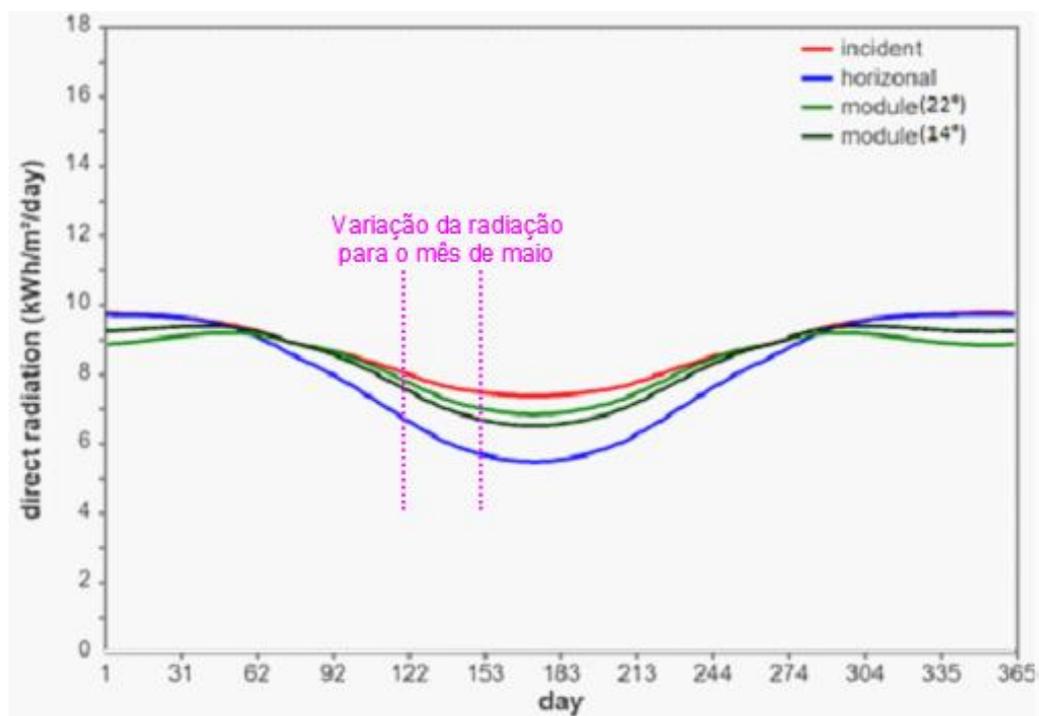
Figura 37: Comparativo da previsão de geração de energia normalizada para o ano de 2022, sem correção azimutal e de inclinação.



Fonte: elaboração própria através do PVSYSYST.

Essa análise tem como finalidade estabelecer a relação das hipóteses com referência a orientação (azimute), a inclinação dos módulos e a metodologia de alterar o coeficiente de transferência do calor do PVSYSYST e assim verificar qual o desempenho esperado para o ano de 2022, que é o primeiro ano de operação da usina. De maneira global, é previsto um ganho na performance oriundo da variação da temperatura de 4,71 % na energia normalizada do sistema flutuante sobre o sistema de solo (sem a correção azimutal e de orientação), onde, nos meses de janeiro, novembro e dezembro, é esperada uma maior produção de energia normalizada para a usina de solo. No mês de maio de 2022 é esperado que a usina flutuante apresente um desempenho 9,4 % superior a usina de solo. Tal resultado é condizente com os dados apresentados no tópico 2.3.8, no qual aproximadamente 60 % dos dias do ano de 2022 é esperado um nível de radiação superior para os módulos na orientação flutuante. A Figura 38, apresenta o intervalo de radiação calculado para o mês de maio de 2022 (aproximadamente 9,4 % de desempenho superior para a usina flutuante em comparação com a de solo).

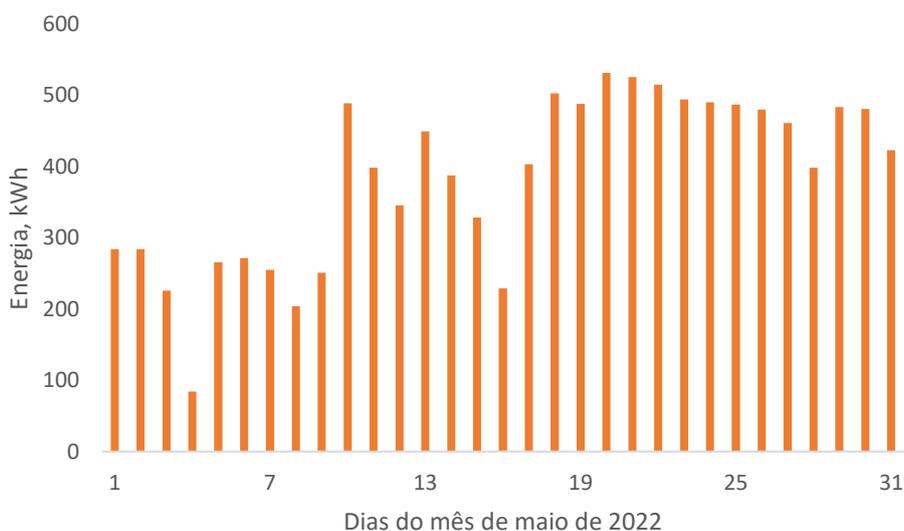
Figura 38: Radiação esperada para o mês de maio de 2022.



Fonte: adaptado de HONSBURG; BOWDEN, (2019).

Por meio da coleta e tratamento dos dados da produção de energia de um exemplar do inversor do gerador de solo, foi obtido o montante de produção de energia elétrica de 11.922 kWh para o mês de maio de 2022 (12.417 kWh previsto pelo PVSYST), como mostra a Figura 39.

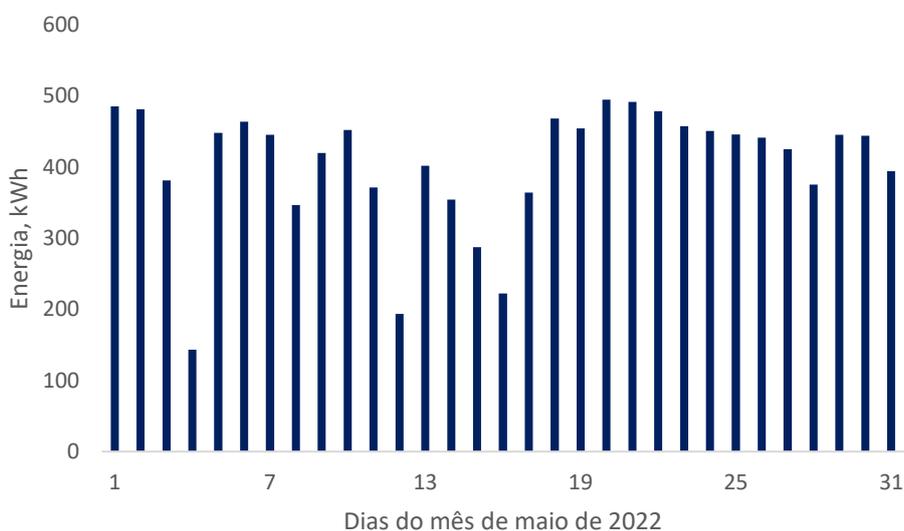
Figura 39: Energia diária produzida pelo sistema de solo.



Fonte: elaboração própria.

Utilizando-se do mesmo processo para o arranjo flutuante, foi obtido o montante de produção de energia elétrica de 12.514 kWh para o mês de maio de 2022 (12.539 kWh previsto pelo PVSYST), assim como demonstra a Figura 40.

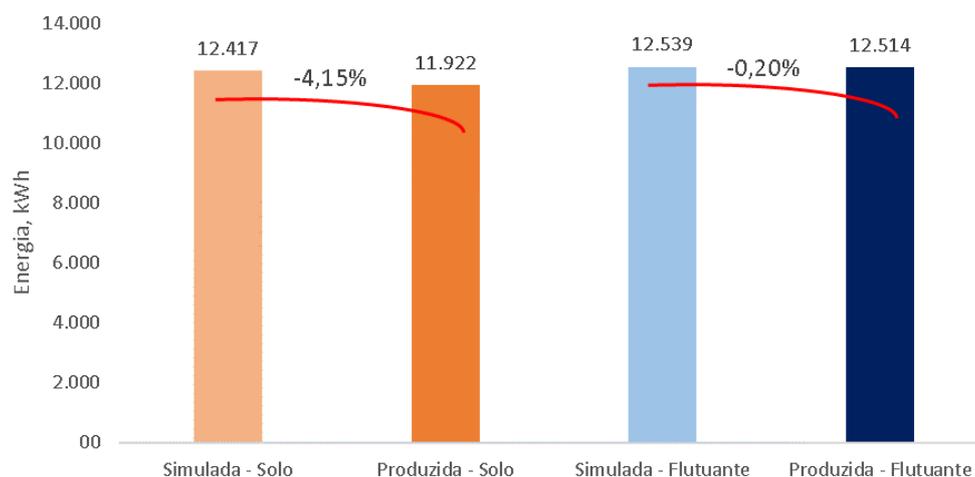
Figura 40: Energia diária produzida pelo sistema flutuante.



Fonte: elaboração própria.

Realizando a comparação entre a quantidade de energia produzida e a energia simulada dos sistemas fotovoltaicos, foi observado que para ambos a energia produzida foi menor do que a energia simulada. A Figura 41 apresenta o resultado dessa comparação.

Figura 41: Comparação da energia normalizada produzida com a energia simulada das plantas para o mês de maio de 2022.



Fonte: elaboração própria.

Conforme apresentado por Lorenzo (2003), as variações entre a energia produzida e a simulada por *softwares* tem ocorrência comum, havendo um limite no erro mensal tolerável de mais ou menos 30 %. Os resultados alcançados se apresentaram bem abaixo da amplitude sugerida, sendo possível também concluir que o coeficiente de transferência de calor apresentado por Tina et. al. (2021) tem potencial para representar o efeito do corpo d'água e a influência da temperatura na usina flutuante de Itumbiara.

A Tabela 9 apresenta o ângulo solar de Itumbiara para os dias do mês de maio de 2022. Esses dados são essenciais para normalizar a produção de energia entre as usinas que possuem a inclinação dos módulos fotovoltaicos distintas. Os dados de radiação solar para cada dia do na região de Itumbiara são apresentados no ANEXO D.

Tabela 9: Ângulo solar de Itumbiara para os dias do mês de maio de 2022.

Dia do ano	Dia de Maio	$\alpha$ [graus]
121	1	56,70
122	2	56,39

123	3	56,08
124	4	55,78
125	5	55,49
126	6	55,20
127	7	54,91
128	8	54,63
129	9	54,35
130	10	54,08
131	11	53,82
132	12	53,56
133	13	53,30
134	14	53,05
135	15	52,81
136	16	52,57
137	17	52,34
138	18	52,11
139	19	51,89
140	20	51,67
141	21	51,46
142	22	51,26
143	23	51,06
144	24	50,87
145	25	50,68
146	26	50,50
147	27	50,33
148	28	50,16
149	29	50,00
150	30	49,85
151	31	49,70

Fonte: elaboração própria através de HONSBURG; BOWDEN, (2019).

Aplicando o ângulo solar  $\alpha$  na Equação (8) é possível encontrar o coeficiente de equivalência devido a inclinação na produção solar a  $14^\circ$  (usina de solo) e  $22^\circ$  (usina flutuante) na região de Itumbiara para o mês de maio 2022. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Coeficiente de equivalência de inclinação da produção solar a 14° e 22° na região de Itumbiara para o mês de maio 2022.

<b>Dia do ano</b>	<b>Dia de maio</b>	<b><math>\alpha</math> [graus]</b>	<b>Coeficiente</b>
121	1	56,70	1,0393
122	2	56,39	1,0401
123	3	56,08	1,0410
124	4	55,78	1,0418
125	5	55,49	1,0426
126	6	55,20	1,0434
127	7	54,91	1,0442
128	8	54,63	1,0450
129	9	54,35	1,0458
130	10	54,08	1,0466
131	11	53,82	1,0473
132	12	53,56	1,0480
133	13	53,30	1,0488
134	14	53,05	1,0495
135	15	52,81	1,0502
136	16	52,57	1,0509
137	17	52,34	1,0515
138	18	52,11	1,0522
139	19	51,89	1,0528
140	20	51,67	1,0535
141	21	51,46	1,0541
142	22	51,26	1,0547
143	23	51,06	1,0553
144	24	50,87	1,0559
145	25	50,68	1,0564
146	26	50,50	1,0570
147	27	50,33	1,0575
148	28	50,16	1,0580
149	29	50,00	1,0585
150	30	49,85	1,0589
151	31	49,70	1,0594

Fonte: elaboração própria através de HONSBURG; BOWDEN, (2019).

Além disso, devido à diferença na orientação com relação ao azimute das usinas, haverá uma discrepância de 1% na produção de energia em relação ao posicionamento da usina de solo para com a usina flutuante, conforme apresentado pelas Figuras 33 e 36. Acrescendo esse

percentual ao coeficiente de correção devido à inclinação, tem-se a parametrização da produção de energia na mesma base de comparação com relação à inclinação e orientação e, por consequência, da irradiação solar dos módulos da usina de solo e flutuante. A Tabela 11 apresenta os valores de parametrização finais da produção solar da usina de solo.

Tabela 11: Coeficiente de equivalência de inclinação a 14° e 22° e azimute a 2° e 8°, respectivamente, na região de Itumbiara para o mês de maio 2022.

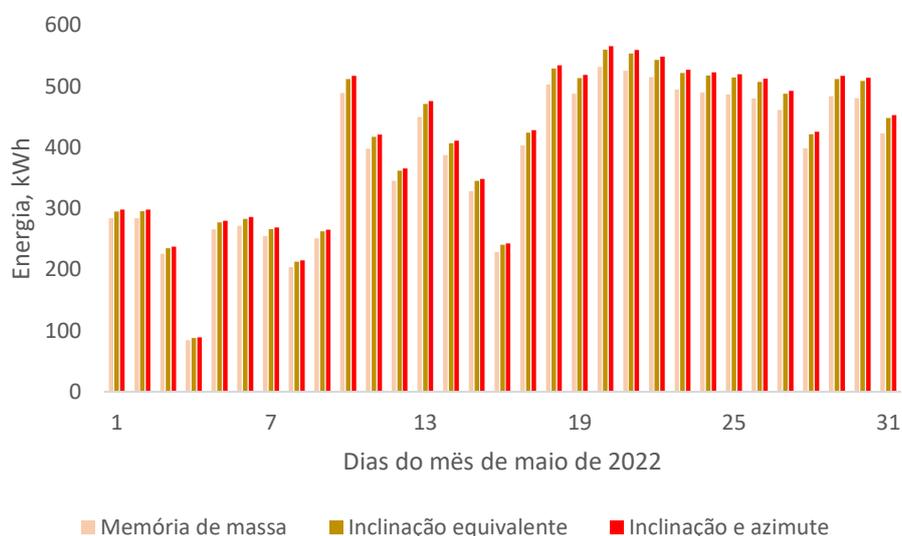
<b>Dia do ano</b>	<b>Dia de Maio</b>	<b>Coeficiente</b>
121	1	1,0493
122	2	1,0501
123	3	1,0510
124	4	1,0518
125	5	1,0526
126	6	1,0534
127	7	1,0542
128	8	1,0550
129	9	1,0558
130	10	1,0566
131	11	1,0573
132	12	1,0580
133	13	1,0588
134	14	1,0595
135	15	1,0602
136	16	1,0609
137	17	1,0615
138	18	1,0622
139	19	1,0628
140	20	1,0635
141	21	1,0641
142	22	1,0647
143	23	1,0653
144	24	1,0659
145	25	1,0664
146	26	1,0670
147	27	1,0675
148	28	1,0680
149	29	1,0685
150	30	1,0689

151	31	1,0694
-----	----	--------

Fonte: elaboração própria através de HONSBURG; BOWDEN, (2019) e PVSYS (2022).

Empregando os coeficientes da Tabela 11 nos dias relativos ao mês de maio de 2022, a produção da usina de solo passa de 11.922 kWh para 12.538 kWh com a correção da inclinação e para 12.664 kWh com a correção azimutal e da inclinação em conjunto. A Figura 42 apresenta a energia diária produzida no mês de maio de 2022 com as devidas correções.

Figura 42: Energia diária produzida pelo sistema solo, na mesma base de comparação a flutuante (inclinação e azimute).

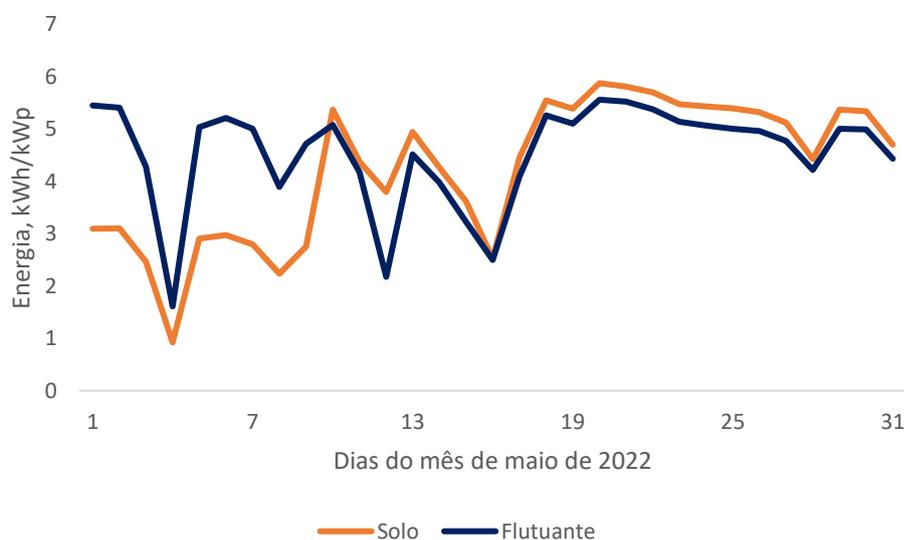


Fonte: elaboração própria.

A produção de energia da usina de solo em maio de 2022 foi incrementada, em média, aproximadamente 6 % com a introdução da mesma base comparativa entre a inclinação e orientação dos módulos. Essas grandezas se mostraram variáveis cruciais no desempenho dos sistemas fotovoltaicos. O ângulo azimutal tem um impacto pouco significativo em pequenas variações a partir do norte geográfico no hemisfério sul; já a inclinação dos módulos, é preciso estar próxima a latitude do local de instalação do sistema, para que esteja otimizada (CHRISTENSEN; BARKER, 2001).

Fazendo o uso da Equação (8) nos dados de produção apresentados na Figura 42, a produção de energia diária para o mês de maio de 2022 foi normalizada e os resultados são mostrados na Figura 43.

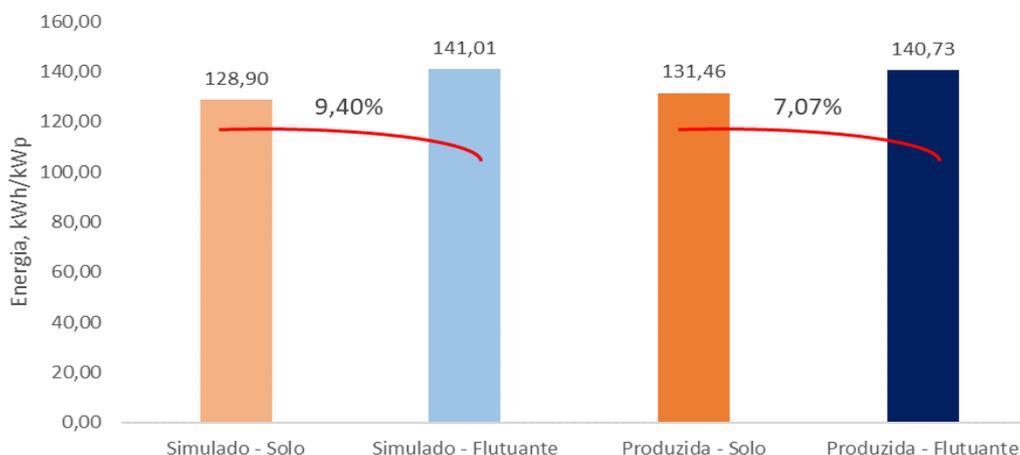
Figura 43: Comparação da energia normalizada das usinas.



Fonte: elaboração própria.

A partir da análise da Figura 43 é possível notar que há uma preponderância da produção da usina flutuante até o nono dia do mês de maio; porém, para os demais dias do mês, a usina solo possui uma melhor performance. Conforme expõe a Figura 44, o ganho esperado pela influência da temperatura simulado entre a usina de solo e flutuante foi de 9,40 % para o mês de maio de 2022, enquanto o observado na energia produzida para o mesmo período foi de 7,07 %.

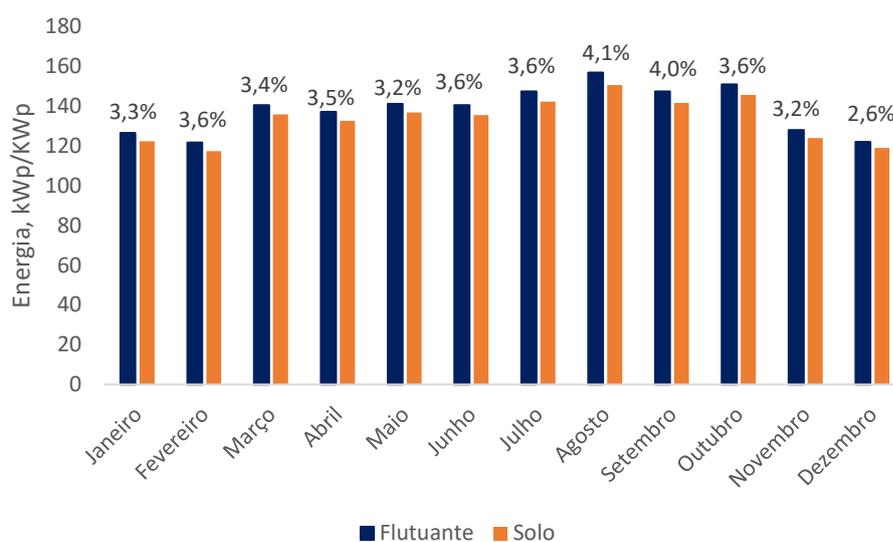
Figura 44: Comparação do ganho de performance simulado com o efetivo pela influência da temperatura no mês de maio de 2022.



Fonte: elaboração própria.

Utilizando a mesma metodologia e aplicando as correções de inclinação e azimute (ANEXO D) nos resultados previstos pelo PVSYST (Figura 37), é obtido a previsão de geração e desempenho global em uma mesma base que estão apresentados conforme Figura 45.

Figura 45: Comparativo da previsão de geração de energia normalizada para o ano de 2022, com correção azimutal e de inclinação.



Fonte: elaboração própria.

Observando os resultados encontrados em literatura (Tabela 12), os dados alcançados no presente estudo mais se aproximam dos resultados obtidos por Alencar Filho (2018), que também isolou a variável da temperatura para verificar sua ingerência em uma usina solar fotovoltaica flutuante.

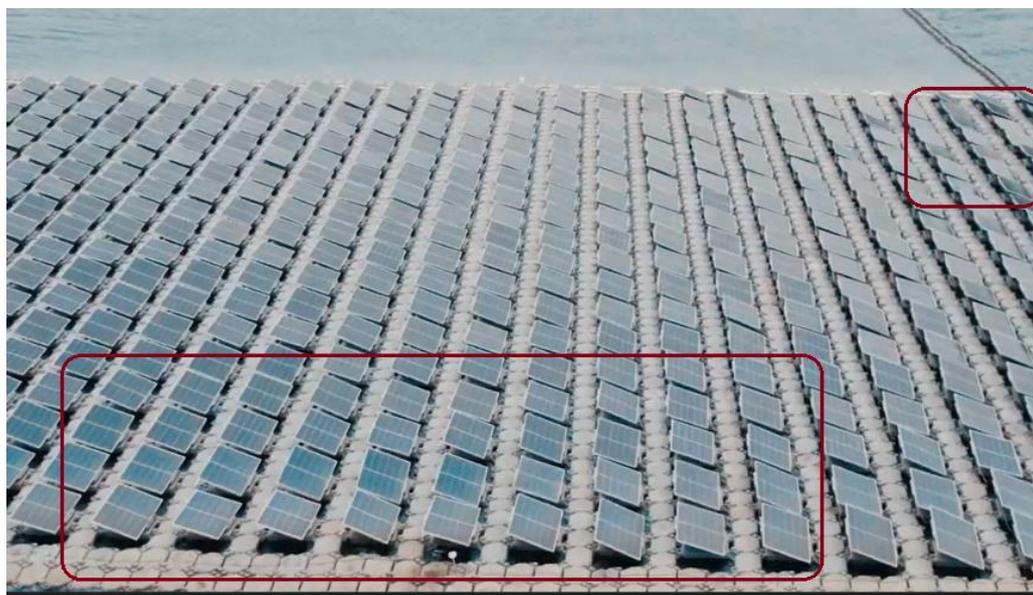
Tabela 12: Ganho com efeito da temperatura encontrado na literatura.

Bibliografia	Ganho com o e feito da temperatura (%)
ALENCAR FILHO, 2018	5,0
DO SACRAMENTO, 2015	11,0
CHOI, 2014	11,0
KAMUYU, 2018	10,0

Fonte: elaboração própria.

Com os resultados obtidos é esperado que a usina flutuante performe de modo a produzir na média anual normalizada 3,5% a mais de energia elétrica do que a usina terrestre. Em que pese, haja uma vantagem na geração de energia da usina solar flutuante em comparação a usina de solo, o resultado esperado se encontra abaixo dos demais observados em literatura. Os resultados obtidos por Alencar Filho (2018) e Do Sacramento (2015) foram embasados em apenas um módulo fotovoltaico em um corpo d'água sem a incidências de ondas. Choi (2014) realizou suas análises considerando três usinas em locais distintos, entretanto, foi verificado que havia pouca probabilidade da incidência fortes de ondas. Em suas modelagens, Kamuyu (2018) não considerou diretamente o efeito das ondas, apenas a velocidade dos ventos como variável isolada. Posto isso, se faz possível concluir que o efeito das ondas na usina em estudo possui influência considerável nos resultados previstos. A Figura 46 destaca a desorientação que o efeito das ondas do amplo reservatório da UHE de Itumbiara causa em sua usina flutuante.

Figura 46: Desorientação dos módulos fotovoltaicos promovido pelas ondas.



Fonte: elaboração própria.

Em uma configuração de módulos fotovoltaicos conectados em série (tecnologia de inversor “*string*”), assim como no caso da usina flutuante desta dissertação, a corrente elétrica é limitada pelo módulo menos eficiente, pois a corrente elétrica em toda a série é a mesma, enquanto a tensão gerada em cada módulo pode variar devido a diferenças na intensidade de

luz solar recebida. Quando um dos módulos da série está desorientado e recebe menos luz solar do que os demais, sua eficiência diminui e conseqüentemente a corrente elétrica gerada é menor do que a produzida pelos outros módulos da série. Como a corrente elétrica é limitada pelo módulo menos eficiente, o fluxo de corrente em toda a série é restrito pela corrente do módulo desorientado, resultando em uma diminuição significativa na geração de energia elétrica da série. Esta é a hipótese mais plausível para explicar os resultados obtidos estarem abaixo dos encontrados na literatura e reforça que a premissa da velocidade dos ventos e a propensão local de ondas devem ser fatores preponderantes para a construção de novas usinas fotovoltaicas flutuantes.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O propósito principal dessa dissertação foi avaliar o desempenho esperado para as plantas fotovoltaicas da usina hidroelétrica de Itumbiara, de Furnas, de maneira teórica, incluindo alguns resultados experimentais, buscando avaliar o ganho de desempenho esperado pela influência da temperatura promovida pelo corpo d'água.

Para isso, foi realizado um levantamento das plantas fotovoltaicas flutuantes existentes no mundo e catalogadas 166 usinas, representando uma capacidade instalada de 1.927,21 MW<sub>P</sub>. Estima-se que as usinas flutuantes catalogadas no presente trabalho representem de 65 % a 70 % das usinas flutuantes no mundo até o final de 2021. Com a pesquisa foi possível ver as particularidades das usinas construídas, observando-se que dentre as tendências está a construção de usinas de maior porte, com módulos de maior capacidade, sempre conectadas à rede, o que ocorreu notadamente a partir do ano de 2016.

Mediante o levantamento da literatura com o mesmo objetivo deste trabalho (usinas de solo e flutuantes na mesma região), foi determinado que o ganho médio na produção de energia de usinas flutuantes varia entre 5 e 11 %.

Através da simulação dos geradores fotovoltaicos de Itumbiara no software PVSYST, foi calculado um ganho médio anual de 3,5 % superior na produção de energia da usina flutuante sobre a usina constituída em solo. Para esse cálculo, foi modificando o coeficiente de transferência de calor da usina flutuante, de modo a representar o efeito do corpo da água e, conseqüentemente, da temperatura na produção de energia elétrica. O coeficiente de troca de calor adotado foi de 31,9 W/m<sup>2</sup>K para a usina flutuante e de 20 W/m<sup>2</sup>K para a usina de solo.

A partir da memória de massa de um inversor da usina solar e outro da usina de solo, foram extraídos os dados de geração do mês de maio de 2022 para ambos os geradores. Esse mês foi escolhido devido a disponibilidade de dados de geração da usina solar flutuante, que se encontrava em instabilidade operativa em virtude do caráter experimental de sua estrutura de flutuação. Além disso, o mês de maio apresentou baixa variação hidrológica do reservatório de Itumbiara, baixa incidência de rajadas de vento e maior amplitude de variação da temperatura ambiente. Assim, se acredita minimizar as interferências dos sistemas de ancoragem, amarração e flutuação, isolando ao máximo o objetivo da dissertação, que é a avaliação do impacto da temperatura no desempenho da usina flutuante e o ganho da performance.

O valor da produção normalizada, simulado no PVSYST, para o mês de maio de 2022 para a usina de solo foi de 128,90 kWp/kWp, enquanto o da usina flutuante foi de 141,01 kWp/kWp, indicando um ganho de performance esperado de 9,4 %. Entretanto, como a usina de solo está orientada com um azimute de 2° e seus módulos inclinados a 14°, enquanto a usina flutuante está com um azimute de 8° e seus módulos inclinados a 22°, foi realizado um procedimento que permitiu converter essas inclinações e o azimute em um patamar único, de forma a possibilitar cálculos e comparações em uma base comum. O resultado nas energias produzidas foi uma variação de aproximadamente 5 % de diferença devido a inclinação dos módulos e de 1 % devido a variação do azimutal.

Ao aplicar os resultados obtidos com relação à orientação e à inclinação na memória de massa dos inversores, foi encontrado uma produção média de 131,46 kWh/kWp para a usina de solo e de 140,73 kWh/kWp para a usina flutuante, denotando um ganho de performance real de 7,1 % para o mês de maio de 2022.

Também foi comparada a produção de energia simulada com a produzida, para se verificar a precisão da simulação, em que, para o mês de maio de 2022, a energia simulada para a usina em solo foi de 12.417 kWh e a produzida foi de 11.922 kWh, representando um erro de 4,15 %. Já para a usina flutuante, a energia simulada para o mês de maio de 2022 foi de 12.539 kWh e a produzida foi de 12.514 kWh, representando um erro de aproximadamente 0,20 %.

Apesar dos dados serem satisfatórios e se apresentarem dentro de uma faixa de variação aceitável, a amostra examinada de apenas um exemplar de inversor de cada usina e de apenas um mês de geração é um ponto a ser aperfeiçoado. O sensoriamento para monitorar variáveis, como a temperatura ambiente, temperatura de operação dos módulos e da radiação solar no mesmo local das usinas, é um procedimento que poderá melhorar a análise não só da influência da temperatura, mas da eficiência global dos geradores fotovoltaicos flutuantes. Além disso, foi observado que as ondas têm influência significativa na performance de uma usina flutuante, principalmente quando há uma usina constituída em um lago com vasta extensão, como é o caso da UHE de Itumbiara.

Porquanto o foco dessa dissertação se concentrou na determinação da influência da temperatura na geração de eletricidade fotovoltaica em comparação com uma constituída em solo, outras particularidades não foram consideradas e deverão ser aprofundadas em estudos futuros, dentre elas:

- A instrumentação e sensoriamento *in-loco* para aumentar a acurácia na análise dos dados, com relação à temperatura, irradiação e velocidade dos ventos e ondas;
- As implicações dos sistemas de ancoragem, amarração e dos flutuadores na produção de energia;
- Estudo do impacto da variação do montante da água acumulada nos reservatórios na geração de energia;
- O efeito dos ventos e das ondas na produção de energia no arranjo das *strings* dos inversores com tecnologia central;
- A aplicabilidade de módulos bifaciais para aumentar a produção de energia flutuante devido à reflexibilidade do corpo d'água;
- A utilização da tipologia de inversores que permitem o uso do MLPE (*Module-Level Power Electronics*) para aumentar o desempenho das usinas frente ao efeito das ondas e ancoragem;

A energia solar é uma importante fonte de energia renovável, e as usinas flutuantes são uma alternativa viável para a geração de energia em áreas com baixo potencial para outras atividades, como os reservatórios de hidrelétricas, apresentando um melhor desempenho do que as usinas constituídas em solo. No entanto, a eficiência e a estabilidade dessas usinas são influenciadas por diversos fatores, entre eles a temperatura. Portanto, o presente trabalho possui o potencial para contribuir na concepção de novos projetos de usinas flutuantes, pois além de apresentar uma metodologia que permite mensurar a influência da temperatura na geração de energia elétrica de uma usina solar fotovoltaica flutuante, indica aspectos significativos quanto a estrutura de flutuação, influência das ondas e escolha da tecnologia dos inversores.

## REFERÊNCIAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Programa de Pesquisa de Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica**. 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d>. Acesso em: 16 out. 2021.

ALENCAR FILHO, A. A. R.; CARVALHO, P. C. M. D.; DUPONT, I. M. Influência da distância de painéis fotovoltaicos em relação à água sobre a eficiência energética. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018.

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados á rede**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar. **Infográfico**. 2022a. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/69ews69cação69/>>. Acesso em: 08 mar. 2022.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar. **Infográfico**. 2022b. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2022/01/2022.01.11-Infografico-ABSOLAR-n%C2%B0-39.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2022.

AutoCad. **Software**. 2022. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/>>. Acesso em: 18 jun. de 2022.

BEN - Balanço Energético Nacional. **Relatório Final**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2022.

BASARAN, Kivanc; CETIN, Numan Sabit; BOREKCI, Selim. Energy management for on-grid and off-grid wind/PV and battery hybrid systems. **IET Renewable Power Generation**, v. 11, n. 5, p. 642-649, 2017.

BATISTA, Fani Tamires de Souza; CHAVES, Michele de Oliveira. Capítulo 4 – Combustíveis Fósseis: Tipos e Combustão. **Meio Ambiente e Suas Tecnologias**. P. 146. 2021.

BURESCH, Matthew. Photovoltaic energy systems: Design and installation. **New York**, 1983.

Canal Energia. **UHE Itumbiara terá usina solar flutuante**. 2020. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53122593/uhe-itumbiara-tera-usina-solar-flutuante>>. Acesso em: 16 out. 2021.

CATENA, M.; CASCONI, I.; CARBONE, M. Performance estimation of bifacial pv modules: a simulation approach through both physical and semi-empirical math models and its validation using real bifacial plant data. In: **Proceedings of the 33<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**. Rom. 2018.

CAZZANIGA, Raniero. Floating PV structures. In: **Floating PV Plants**. Academic Press, 2020. P. 33-45.

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **SunData**. 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Componentes de um Sistema Fotovoltaico**. 2014. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=341](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=341)>. Acesso em: 08 de set. de 2021.

CHARLES LAWRENCE KAMUYU, Waithiru et al. Prediction model of photovoltaic module temperature for power performance of floating PVs. **Energies**, v. 11, n. 2, p. 447, 2018.

CHOI, Young-Kwan. 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.

CHRISTENSEN, Craig B.; BARKER, Greg M. Effects of tilt and azimuth on annual incident solar radiation for United States locations. In: **International Solar Energy Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2001. p. 225-232.

Ciel et terre. **Our references**. 2021. Disponível em: <<https://www.ciel-et-terre.net/our-references/>>. Acesso em: 20 de set. de 2021.

DE CASTRO, Nivalde José. IMPLICAÇÕES DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA A MATRIZ ELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO. **A geopolítica da energia do século XXI**, 2021.

DE PAULA, João Frederico Souza et al. Análise Comparativa De Desempenho De Um Sistema Fotovoltaico Simulado Com As Ferramentas Pvsyst E Sam (System Advisor Model): Pvsyst And System Advisor Model. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2022. p. 1-10.

DO SACRAMENTO, Elissandro Monteiro et al. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. **IET Renewable Power Generation**, v. 9, n. 8, p. 1019-1024, 2015.

DUPRÉ, Olivier et al. Field performance versus standard test condition efficiency of tandem solar cells and the singular case of perovskites/silicon devices. **The Journal of physical chemistry letters**, v. 9, n. 2, p. 446-458, 2018.

Ecoinventos. **Comienza a operar en China el mayor central solar flotante del mundo**. 2022. Disponível em: <[https://ecoinventos.com/central-solar-flotante-dezhou/?fbclid=IwAR1coreIhNE8ArJRhFrjaQnPHoDdnXj2qkWBVUM\\_ESnSUWxqtMAW\\_L1Xl6E](https://ecoinventos.com/central-solar-flotante-dezhou/?fbclid=IwAR1coreIhNE8ArJRhFrjaQnPHoDdnXj2qkWBVUM_ESnSUWxqtMAW_L1Xl6E)>. Acesso em 18/02/2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Expansão da Geração Solar Fotovoltaica Flutuante**. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/71ews71cação71-dados->

abertos/72ews72cação72/PublicacoesArquivos/72ews72cação-466/NT%20Solar%20Fotovoltaica%20Flutuante.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2022.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Nota Técnica. **Usina Híbridas: Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento**. 2018. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-393/NT%20EPE-DEE-NT-011-2018-r0%20\(Usinas%20h%C3%ADbridas\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-393/NT%20EPE-DEE-NT-011-2018-r0%20(Usinas%20h%C3%ADbridas).pdf)>. Acesso em: 16 de mar. de 2022.

FARFAN, Javier; BREYER, Christian. *Combining floating solar photovoltaic power plants and hydropower reservoirs: a virtual battery of great global potential*. *Energy procedia*, v. 155, p. 403-411, 2018.

FURNAS. **Furnas inicia geração de hidrogênio pela primeira vez na sua história**. 2021. Disponível em: <<https://www.furnas.com.br/noticia/103/noticias/1623/furnas-inicia-geracao-de-hidrogenio-pela-primeira-vez-na-sua>>. Acesso em: 24 mar. de 2022.

GEDELPLASTICOS. *Homepage*. 2021. Disponível em: <<https://gedelplasticos.com.br/artigos/pead-polietileno-de-alta-densidade/>>. Acesso em: 12 out. de 2022.

Google Earth. *Software*. 2022. Disponível em: <<https://earth.google.com/>>. Acesso em: 18 jun. de 2022.

GTM RESEARCH. **Trends in Solar Technology and System Prices**. [S.l.]. 2018.

GU, Wenbo et al. A coupled optical-electrical-thermal model of the bifacial photovoltaic module. *Applied Energy*, v. 258, p. 114075, 2020.

HONSBURG C.B; BOWDEN S.G. 2019. *Photovoltaics Education Website*. Disponível em: <<https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-on-a-tilted-surface>>. Acesso em: 17 jun. de 2022.

Infratech Industries. **Our Projects.** 2021. Disponível em <<https://infratechindustries.com/floating-solar/>>. Acesso em: 24 de set. de 2021.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Mapa de estações [A035] ITUMBIARA – GO.** 2022. Disponível em: <<https://mapas.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 10 out. de 2022.

IRENA - *International Renewable Energy Agency*. **Renewable Energy Auctions.** 2020a. Disponível em: <<https://www.irena.org/policy/Renewable-Energy-Auctions>>. Acesso em: 16 out. 2021.

IRENA - *International Renewable Energy Agency*. **Renewable Power Generation Costs in 2019.** 2020c International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-244-4.

IRENA - *International Renewable Energy Agency*, 2020b. **Renewable Energy Employment By Technology.** Disponível em: <<https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Benefits/Renewable-Energy-Employment-by-Country>>. Acesso em: 08 de ago. de 2021.

IRENA - *International Renewable Energy Agency*, 2021a. **Installed Capacity Trends.** Disponível em: <<https://irena.org/statistics>>. Acesso em: 08 de ago. de 2021.

IRENA - *International Renewable Energy Agency*, 2021b. **Renewable Energy in the NDCs.** Disponível em: <<https://irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Climate-Change/Renewable-Energy-in-the-NDCs>>. Acesso em: 08 de ago. de 2021.

KARTHIKEYAN, V. et al. Grid-connected and off-grid solar photovoltaic system. In: **Smart Energy Grid Design for Island Countries.** Springer, Cham, 2017. P. 125-157.

KOMILOV, Asliddin. Location and orientation based LCOE: Simplified visual analysis and generalization of the levelized cost of electricity from storageless photovoltaic systems. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 4, p. 5649-5658, 2021.

LALWANI, Mahendra; KOTHARI, D. P.; SINGH, Mool. Investigation of solar photovoltaic simulation softwares. **International journal of applied engineering research**, v. 1, n. 3, p. 585-601, 2010.

LAMERS, M. W. P. E. et al. Temperature effects of bifacial modules: Hotter or cooler?. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 185, p. 192-197, 2018.

LEE, Nathan et al. Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. **Renewable Energy**, v. 162, p. 1415-1427, 2020.

LORENZO, Eduardo. Energy collected and delivered by PV modules. **Handbook of photovoltaic science and engineering**, p. 906-930, 2003.

MACHADO, Gilson Mario Vieira et al. Estudo De Caso De Um Sistema Fotovoltaico Instalado No Campus Da Unicamp Em Diferentes Softwares De Simulação. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2020.

MAHELA, Om Prakash; SHAIK, Abdul Gafoor. Comprehensive overview of grid interfaced solar photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 316-332, 2017.

ONS – Operador Nacional do Sistema. **Níveis dos Reservatórios**. 2022. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados\\_hidrologicos\\_niveis.aspx](http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados_hidrologicos_niveis.aspx)>. Acesso em: 12 out. de 2022.

Pacto Global. **Ambição Net Zero**. 2022. Disponível em: <<https://www.pactoglobal.org.br/pg/ambicao-net-zero>>. Acesso em: 7 mar. 2022.

PARIDA, Bhubaneswari; INIYAN, Selvarasan; GOIC, Ranko. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 3, p. 1625-1636, 2011.

PENG, Jinqing; LU, Lin; YANG, Hongxing. *Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. Renewable and sustainable energy reviews*, v. 19, p. 255-274, 2013.

PIMENTEL DA SILVA, Gardenio Diogo; BRANCO, David Alves Castelo. *Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 36, n. 5, p. 390-400, 2018.

PRNEWswire. **Global Industry Analysts Predicts the World Floating Solar Panels Market to Reach 4.8 Thousand MW by 2026.** 2022. Disponível em: <[PV-Magazine. \*\*Chinese fish pond hosts 550 MW solar farm.\*\* 2022. Disponível em: <<https://www.pv-magazine.com/2022/01/07/chinese-fish-pond-hosts-550-mw-solar-farm/>>. Acesso em 18/02/2022.](https://www.prnewswire.com/75ews-releases/global-industry-analysts-predicts-the-world-floating-solar-panels-market-to-reach-4-8-thousand-mw-by-2026—301461872.html#:~:text=Global%20Floating%20Solar%20Panels%20market%20is%20projected%20to%20register%20significant,33.7%25%20over%20the%20analysis%20period.>https://www.prnewswire.com/75ews-releases/global-industry-analysts-predicts-the-world-floating-solar-panels-market-to-reach-4-8-thousand-mw-by-2026—301461872.html#:~:text=Global%20Floating%20Solar%20Panels%20market%20is%20projected%20to%20register%20significant,33.7%25%20over%20the%20analysis%20period.>. Acesso em: 09 de mar. de 2022.</p></div><div data-bbox=)

REC. **Riding the wave of solar energy: Why floating solar installations are a positive step for energy generation.**, p. NE-18-27, Rev D. 2018, 2018. Disponível em:<[https://www.recgroup.com/sites/default/files/documents/wp\\_-\\_floating\\_pv\\_rev\\_d\\_web.pdf](https://www.recgroup.com/sites/default/files/documents/wp_-_floating_pv_rev_d_web.pdf)>. Acesso em: 17 mar. 2022.

ROSA-CLOT, Marco; TINA, G. M. Submerged PV systems. **Submerged and Floating Photovoltaic Systems**, p. 65-87, 2018.

SAEED, Faisal; ZOHAIB, Abdullah. Quantification of Losses in a Photovoltaic System: A Review. **Engineering Proceedings**, v. 11, n. 1, p. 35, 2022.

SAMPAIO, Priscila Gonçalves Vasconcelos; GONZÁLEZ, Mario Orestes Aguirre. *Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 74, p. 590-601, 2017.

Seaflex. **Projects**. 2021. Disponível em < <https://www.seaflex.com/projects/>>. Acesso em: 24 de set. De 2021.

Science Based Targets (SBT). **Ambitious Corporate Climate Action**. 2022. Disponível em: <<https://sciencebasedtargets.org/>>. Acesso em: 7 mar. 2022.

SILVA, Demostenes Barbosa da. **Produtividade ambiental das fontes de energia**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SMA, SHP75-10. **Datasheet**. 2019. Disponível em <<https://files.sma.de/downloads/SHP75-10-DEN1917-V24.pdf>>. Acesso em: 17 jun. de 2022.

STEIN, Joshua S.; KLISE, Geoffrey T. **Models used to assess the performance of photovoltaic systems**. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2009.

STRANGUETO, Karina Maretti. Estimativa do potencial brasileiro de produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de hidroelétricas. **Campinas: Universidade Estadual de Campinas**, 2016.

Sungrow. **Floating PV Cases**. 2021. Disponível em < <https://en.sungrowpower.com/caseDetail/28>>. Acesso em: 24 de set. De 2021.

TAHA, Azmi Z. The oversizing method of estimation in PV systems. **Renewable energy**, v. 6, n. 5-6, p. 487-490, 1995.

Times of Malta. **Prototype floating PV panels being tested**. 2021. Disponível em <<http://www.timesofmalta.com/articles/view/20141221/environment/Prototype-floating-PV-panels-being-tested.549192>>. Acesso em: 24 de set. de 2021.

TINA, Giuseppe Marco et al. Comparative analysis of monofacial and bifacial photovoltaic modules for floating power plants. **Applied Energy**, v. 281, p. 116084, 2021.

TRINA, TSM-390. **Datasheet**. 2020. Disponível em <[https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Datasheet\\_DE14H%28II%29\\_HC\\_1500V\\_May2019\\_NT.pdf](https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Datasheet_DE14H%28II%29_HC_1500V_May2019_NT.pdf)>. Acesso em: 23 nov. de 2021.

TSOUTSOS, Theocharis; FRANTZESKAKI, Niki; GEKAS, Vassilis. Environmental impacts from the solar energy technologies. **Energy policy**, v. 33, n. 3, p. 289-296, 2005.

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*. **Race To Zero**. 2022. Disponível em: <<https://unfccc.int/climate-action/race-to-zero-campaign>>. Acesso em: 7 mar. 2022.

UNGA - *United Nations General Assembly*. **Ensuring access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all**. 77<sup>th</sup> Annual Report of the Secretary-General. Nova Iorque, 28 de julho de 2020. Disponível em: <<https://undocs.org/A/75/265>>. Acesso em: 16 out. 2021.

UNGC - *United Nations Global Compact*. **Business Ambition for 1.5°C**. 2019. Disponível em: <<https://unglobalcompact.org/take-action/events/climate-action-summit-2019/business-ambition>>. Acesso em: 7 mar. 2022.

VO, Thi Thu Em et al. Overview of Possibilities of Solar Floating Photovoltaic Systems in the OffShore Industry. **Energies**, v. 14, n. 21, p. 6988, 2021.

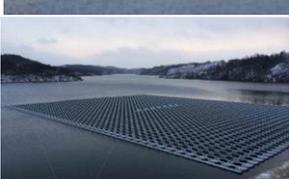
WHITTAKER, Trevor; FOLLEY, Matt; HANCOCK, Jonathan. Environmental Loads, Motions, and Mooring Systems. In: **Floating PV Plants**. Academic Press, 2020. P. 47-66.

SANTOS, Fernando António; SANTOS, Fernando Miguel. **Geração distribuída versus centralizada**. m, 2008.

### ANEXO A – Geradores solar fotovoltaico flutuante em operação no mundo

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2007		Aichi - Japão	National Institute of Advanced Industrial Science & Technology	20 kWp	Não
2008		Far Niente - EUA	SPG Solar	175 kWp	Não
2008		Gundlach Bunshu Wineries – EUA	SPG Solar	30 kWp	Não
2009		Bubano – Itália	Byro	500 kWp	Sim
2009		Agost - Espanha	Celemin Energy & Polytechnic University of Valencia	24 kWp	Não
2009		Solarolo - Itália	D.A.I.E.T.	20 kWp	Não
2010		Petra Winery - Itália	Terra Moretti Holding	200 kWp	Sim
2010		Agost – Espanha	Celemin Energy & Polytechnic University of Valencia	300 kWp	Não
2011		Lake Colignola - Itália	Scienza Industria Technologia	30 kWp	Não
2011		Avetrana - Itália	D.A.I.E.T.	20 kWp	Não

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2011		Piolenc – França 0,016 ha	Ciel et Terre	15,04 kWp	Não
2011		Petaluma – EUA	SPG Solar	350 kWp	Não
2011		Vendée - França	Osesol	4 kWp	Não
2011		Canoe Brook Water Treatment Facility – EUA	ENERActive	112 kWp	Sim
2012		Cheongju – Coréia do Sul	Techwin	20 kWp	Não
2012		HapcheonDam – Coréia do Sul	K-Water	500 kWp	Não
2012		Pommeraisur - França	Osesol	100 kWp	Sim
2013		Bishan Park - Singapura	Phoenix Solar	5 kWp	Sim
2013		Sihwaho Lake – Coréia do Sul	K-Water	20 kWp	Não
2013		Sudbury – Canadá	MIRARCO	0,5 kWp	Não

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2013		Okegawa – Japão 1,16 ha	Ciel et Terre	1176,36 kWp 4536 painéis (260WP JA SOLAR)	Sim
2014		Kawagoe – Japão 0,8 ha	Ciel et Terre	696,15 kWp 2730 painéis (255WP YINGLI)	Sim
2014		Maeno-Ike – Japão 0,98 ha	Ciel et Terre	848 kWp 3392 painéis (250WP YINGLI)	Sim
2014		SheepLands Farm – Reino Unido 0,21 ha	Ciel et Terre	200 kWp 800 painéis (250WP TRINA)	Sim
2014		Yothathikan – Tailândia 0,01 ha	Ciel et Terre	5,39 kWp 22 painéis (245WP KYOCERA)	Sim
2014		Mekorot Eshkol – Israel	Solaris Synergy	50 kWp	Sim
2014		Yasugi – Japão 1,25 ha	Ciel et Terre	1097,6 kWp 4480 painéis (245WP KYOCERA)	Sim
2014		Malta	IRARCO	8 kWp (filme fino)	Não
2014		Calcutá – Índia 0,01 ha	Vikram Solar Pvt. Ltd.	10 kWp 40 painéis (250 WP)	Sim
2015		O-Chang - Coréia do Sul 0,56 ha	Ciel et Terre	494,5 kWp 1978 painéis (250 WP HANWHA)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2015		Kato-Shi – Japão 3,13 ha	Ciel et Terre	2870,28 kWp 11256 painéis (255WP KYOCERA)	Sim
2015		Sawa-Ike – Japão 1,14 ha	Ciel et Terre	1008 kWp 4032 painéis (250WP TRINA)	Sim
2015		Sakasama-Ike – Japão 2,61 ha	Ciel et Terre	2313,36 kWp 9072 painéis (255WP KYOCERA)	Sim
2015		Fuku-Ike – Japão 1,11 ha	Ciel et Terre	1076,4 kWp 4032 painéis (260WP MITSUBISHI)	Sim
2015		Hirai-Ike – Japão 1,26 ha	Ciel et Terre	1125 kWp 4500 painéis (250WP TRINA)	Sim
2015		Hanamidai – Japão 1,26 ha	Ciel et Terre	1153,11 kWp 4522 painéis (255WP KYOCERA)	Sim
2015		Funatsu Osawa – Japão 1,69 ha	Ciel et Terre	1485 kWp 5940 painéis (250WP YINGLI)	Sim
2015		Jamestown – Austrália	Infratech Industries	28 kWp 112 painéis	Sim
2015		Umenoki – Japão 7,43 ha	Ciel et Terre	7750,4 kWp 27456 painéis (275WP YINGLI)	Sim
2015		Sungai Labu - Malásia 4,20 ha	Ciel et Terre	108 kWp 432 painéis (250Wp REC)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2015		Nofar - Israel 4,9 ha	Ciel et Terre	22 kWp 85 painéis (260 Wp HANWHA)	Sim
2015		Bor - Suécia 0,1 ha	Ciel et Terre	13 kWp 50 painéis (250 Wp WINDON)	Não
2015		Ben Acre - Inglaterra	Ciel et Terre	300 kWp 1200 módulos (250 Wp REC)	Sim
2015		Kawarayama Ike - Japão 6,8 ha	Ciel et Terre	1.428 kWp 5.712 módulos (250 Wp SHARP)	Sim
2015		Polybell - Inglaterra 4,7 ha	Ciel et Terre	471 kWp 1.848 módulos (255 Wp REC)	Sim
2015		Reeders - Inglaterra 2 ha	Ciel et Terre	50 kWp 192 módulos (260 Wp WINAICO)	Sim
2015		Park Farm - Inglaterra 4,1 ha	Ciel et Terre	100 kWp 2000 módulos	Não
2015		Woodlane - Inglaterra 6,9 ha	Ciel et Terre	100 kWp 12.000 módulos	Não
2015		Keens Farm - Inglaterra 1,6 ha	Ciel et Terre	100 kWp 1.600 módulos	Não
2016		Godley - Inglaterra 6 ha	Ciel et Terre	2.991 kWp 10.494 módulos (285 Wp JA Solar)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2016		Sakurashita Ike - Japão 3,2 ha	Ciel et Terre	809 kWp 3.234 módulos (250 Wp SHARP)	Sim
2016		Rainha Elizabeth II - Inglaterra 128 ha	Ciel et Terre	6.338 kWp 23.046 módulos (275 Wp SUNTECH)	Sim
2016		UFC Orlando - EUA 3 ha	Ciel et Terre	5 kWp 20 módulos (250 Wp REC)	Sim
2016		Juman Ike - Japão 2,9 ha	Ciel et Terre	490 kWp 1.960 módulos (250 Wp SHARP)	Sim
2016		Sohara Ike - Japão 3,6 ha	Ciel et Terre	2.398 kWp 8.880 módulos (270 Wp MITSUBISHI)	Sim
2016		Naga ike Nishi & Higashi - Japão	Ciel et Terre	3.234 kWp 12.936 módulos (250 Wp REC)	Sim
2016		QE2 - Inglaterra 128 ha	Ciel et Terre	6.337 kWp 23.046 módulos (SUNTECH)	Sim
2016		Kunde - EUA 0,46 ha	Ciel et Terre	10 kWp 38 módulos (260 WP KYOCERA)	Sim
2016		Kobe Oike & Gono Ike - Japão	Ciel et Terre	2.415 kWp 9.468 módulos (250 Wp REC)	Sim
2016		Kas Green Energy - Indonésia 0,07 ha	Ciel et Terre	5 kWp 20 módulos (260 Wp REC)	Não

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2016		Yakino Ike - Japão 3 ha	Ciel et Terre	1.714 kWp 6.720 módulos (255 Wp YINGLI)	Sim
2016		Rengeji Ike - Japão 0,7 ha	Ciel et Terre	300 kWp 1.200 módulos (250 Wp ZNSHINE)	Sim
2016		Tsuga Ike - Japão 9 ha	Ciel et Terre	2.449 kWp 9.072 módulos (270 Wp KYOCERA)	Sim
2016		Hirono Shin Ike - Japão 9 ha	Ciel et Terre	1.751 kWp 7.005 módulos (250 Wp SHARP)	Sim
2016		Tengen - Cingapura 123 ha	Ciel et Terre	300 kWp 1.042 (260 Wp REC e 310 Wp TRINA)	Sim
2016		Panji Huainan - China	Sungrow	40.000 kWp	Sim
2016		Japão	Pvsolarfirst	20.500 kWp	Sim
2016		Rosana - Brasil	Cesp	50 kWp	Sim
2016		Isawa Ike - Japão 1 ha	Ciel et Terre	632 kWp 2340 módulos (270 Wp KYOCERA)	Sim
2016		Ulu Sepri - Malásia 18 ha	Ciel et Terre	270 Wp 900 módulos (300 Wp BLUESUN)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2016		China	Mibetsolar	2.500 kWp	Sim
2016		China	Mibetsolar	4.000 kWp	Sim
2016		Alto Rabagão - Portugal 2.212 ha	Ciel et Terre	218 kWp 840 módulos (260 Wp REC)	Sim
2016		Sayama Ootori Ike - Japão 7,8 ha	Ciel et Terre	2.502 kWp 9.264 módulos (270 Wp KYOCERA)	Sim
2017		Gojiga Ike - Japão 2 ha	Ciel et Terre	572 kWp 2.200 módulos (260 Wp JINKO)	Sim
2017		Pontecorvo - Itália 0,8 ha	Ciel et Terre	343 kWp 1.320 módulos (260 Wp PEIMAR)	Sim
2017		Utilitários Orlando - EUA 1 ha	Ciel et Terre	32 kWp 100 módulos (320 Wp RENESOLA)	Sim
2017		Miraflores - Panamá 14 ha	Ciel et Terre	24 kWp 96 módulos (250 Wp TRINA)	Sim
2017		Banasura Sagar - Índia	Seaflex	500 kWp	Sim
2017		Taoyuan - Taiwan 4,1 ha	Ciel et Terre	481 kWp 1.632 módulos (295 Wp CINTUNG)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2017		Tachiai Oku Ike - Japão 3 ha	Ciel et Terre	835 kWp 3.212 módulos (260 Wp JINKO)	Sim
2017		Heze City - China 3,4 ha	Ciel et Terre	600 kWp 2.070 módulos (290 Wp)	Sim
2017		Besso Ike - Japão 3,2 ha	Ciel et Terre	1.426 kWp 5.280 módulos (270 Wp KYOCERA)	Sim
2017		Geumjeon - Coréia do Sul	Seaflex	2.000 kWp	Sim
2017		Dongmak - Coréia do Sul	Seaflex	324 kWp 1.280 módulos	Sim
2017		Agongdian - Taiwan 9,2 ha	Ciel et Terre	9.994 kWp 34.012 módulos (290 e 295 Wp ABLYTEK)	Sim
2017		Pei County - China 35 ha	Ciel et Terre	9.982 kWp 42.240 módulos (260 Wp GCL)	Sim
2017		Fazenda de Goias - Brasil 0,7 ha	Ciel et Terre	305 kWp 1.150 módulos (265 Wp)	Sim
2017		Yukimine Ike - Japão 2,7 ha	Ciel et Terre	1.568 kWp 5.808 módulos (270 kWp Kyocera)	Sim
2017		Ootsuda Ike - Japão 1,8 ha	Ciel et Terre	3.744 kWp 3.744 módulos (260 Wp REC)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2017		Hirono Nigo Ike - Japão 1,9 ha	Ciel et Terre	1.261 kWp 4.760 módulos (260 Wp LIGHTWAY)	Sim
2017		Engie Pilots - Holanda	Ciel et Terre	65 kWp 240 módulos (270 Wp JA SOLAR e 270 Wp Q CELLS)	Sim
2017		Xinji Huainan - China	Sungrow	102.000 kWp	Sim
2017		Guqiao Huainan - China	Sungrow	150.000 kWp	Sim
2017		Hesbaye Frost - Bélgica 3 ha	Ciel et Terre	998 kWp (3.120 módulos) (320 Wp BYD)	Sim
2017		Plover Cove - Hong Kong 0,14 ha	Ciel et Terre	100 kWp 352 módulos (285 Wp AKCOME)	Sim
2017		Komaga Ike - Japão 5ha	Ciel et Terre	2.297 kWp 7.920 módulos (290 Wp HYUNDAI)	Sim
2018		Anhui GCL - China 168 ha	Ciel et Terre	32.686 kWp 116.736 módulos (280 Wp GCL)	Sim
2018		Lismore - Austrália 4,1 ha	Ciel et Terre	100 kWp 352 módulos (285 kWp AKCOME)	Sim
2018		Tano Ike - Japão 5,7 ha	Ciel et Terre	2.548 kWp 8.942 módulos (285 Wp JINKO)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2018		China	Mibetsolar	1.500 kWp	Sim
2018		Caogangwei - Taiwan 1,1 ha	Ciel et Terre	500 kWp 1.694 módulos (295 Wp RITEK)	Sim
2018		Iwako Ike - Japão 4,8 ha	Ciel et Terre	2.596 kWp 8.800 módulos (260 Wp JA SOLAR)	Sim
2018		Yamakura Dam - China 43 ha	Ciel et Terre	13.744 kWp 50.902 módulos (270 Wp KYOCERA)	Sim
2018		Sugu 2 - Taiwan 3,2 ha	Ciel et Terre	1.133 kWp 3.840 módulos (295 Wp AUO)	Sim
2018		GCL Jining - China 72 ha	Ciel et Terre	6.776 kWp 24.640 módulos (275 kWp GCL)	Sim
2018		Peñol Guatapé - Colômbia	Ciel et Terre	99 kWp 368 módulos (270 Wp JINKO)	Sim
2018		Watashi Ike - Japão 4,1 ha	Ciel et Terre	2.170 kWp 6.289 módulos (345 Wp JINKO)	Sim
2018		Ishitani Ike - Japão 1,4 ha	Ciel et Terre	660 kWp 2.400 módulos (275 Wp YINGLI)	Sim
2018		Azalealaan - Holanda 3,3 ha	Ciel et Terre	1.845 kWp 6.150 módulos (300 Wp HANWHA)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2018		Higashi Ota - Japão 7,1 ha	Ciel et Terre	2.435 kWp 9.020 módulos (270 Wp KYOCERA)	Sim
2018		Suíça	Pvsolarfirst	675 kWp	Sim
2018		Ichinomiya - Japão 6,9 ha	Ciel et Terre	2.242 kWp 6.498 módulos (345 Wp JINKO)	Sim
2018		Tagowa Ike - Japão 7,63 ha	Ciel et Terre	2.359 kWp 8.733 módulos (270 Wp JIS)	Sim
2018		Huancheng Jining - China	Sungrow	50.000 kWp	Sim
2018		Langthwaite - Reino Unido	Seaflex	1.000 kWp 3.520 módulos	Sim
2018		Kelseyville - EUA 1 ha	Ciel et Terre	252 kWp 720 módulos (350 Wp)	Sim
2018		Ashdot - Israel 0,5 ha	Ciel et Terre	269 kWp 736 módulos (365 Wp JINKO)	Sim
2018		Weishan Jining - China	Sungrow	31.000 kWp	Sim
2018		Walden Pond - EUA 0,1 ha	Ciel et Terre	74 kWp 208 módulos (355 Wp JINKO)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2018		Salad Cosmo - EUA 4 ha	Ciel et Terre	607 kWp 2.208 módulos (JINKO)	Sim
2018		Higai Shin Ike - Japão 0,7 ha	Ciel et Terre	497 kWp 1.440 módulos (275 Wp LONGI)	Sim
2018		Musashicho Furu & Shin Ike - Japão	Ciel et Terre	1.310 kWp 3.748 módulos (345 Wp LONGI)	Sim
2018		Sasakuacho Shita & Ue Ike - Japão	Ciel et Terre	1.259 kWp 3.546 módulos (355 Wp AKCOME)	Sim
2018		Sugu 1 - Taiwan 8,8 ha	Ciel et Terre	4.023 kWp 13.410 módulos (300 Wp RITEK)	Sim
2019		Sakayatame Ike - Japão 1,5 ha	Ciel et Terre	633 kWp 1.836 módulos (354 Wp LONGI)	Sim
2019		Hyoshiga Ike - Japão 6 ha	Ciel et Terre	2.703 kWp 10.010 módulos (270 Wp ASTROENERGY)	Sim
2019		Marlenique Farm - África do Sul 0,4 ha	Ciel et Terre	59 kWp 180 módulos (330 Wp JINKO)	Sim
2019		Las Tórtolas - Chile 140 ha	Ciel et Terre	85 kWp 256 módulos (330 Wp JINKO)	Sim
2019		Cmic Pond - Cambodia 3,2 ha	Ciel et Terre	2.835 kWp 7.768 módulos (365 Wp JINKO)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2019		Yuanjiang Yiyang - China	Sungrow	100.000 kWp	Sim
2019		Qintang Guigang - China	Sungrow	20.000 kWp	Sim
2019		Anhi Cecep - China 60 ha	Ciel et Terre	70.005 kWp 194.731 módulos (335 e 360 Wp LERRI)	Sim
2019		Maiwald - alemanha 40 ha	Ciel et Terre	749 kWp 2.304 módulos (325 Wp SUNTECH)	Sim
2019		Yunxi Yueyang - China	Sungrow	20.000 kWp	Sim
2019		Yokawacho Kami Ike - Japão 1,4 ha	Ciel et Terre	621 kWo 1.696 módulos (365 Wp LONGI)	Sim
2019		Sobradinho- Brasil 421.400 ha	Ciel et Terre	1.005 kWp 3.792 módulos (265 Wp)	Sim
2019		Hikumi Ike - Japão 2,8 ha	Ciel et Terre	1.308 kWp 3.492 módulos (365 Wp LERRI)	Sim
2019		Cial Cochin - Índia 1,46 ha	Ciel et Terre	452 kWp 1.316 módulos	Sim
2019		Sayreville - Japão 19,66 ha	Ciel et Terre	4.403 kWp 3.792 módulos (345 Wp CSUN)	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2019		Cuba Este - Japão 5,6 ha	Ciel et Terre	997 kWp 3.024 módulos (SUNTECH)	Sim
2019		Wisewood - Tailândia 2,62 ha	Ciel et Terre	1.261,26 kWp 3.275 módulos (TRINA)	Sim
2019		Kfar Hamaccabi - Israel 7 ha	Ciel et Terre	522 kWp 1.392 kWp (JINKO)	Sim
2020		Miami Airport - EUA 11,27 ha	Ciel et Terre	157 kWp 419 módulos (375 Wp JÁ)	Sim
2020		Hanaoka Ike - Japão 4,4 ha	Ciel et Terre	2.290 kWp 6.107 módulos (375 Wp SUNTECH)	Sim
2020		Rosedale - Japão 34 ha	Ciel et Terre	1.039 kWp 2.736 módulos (JA)	Sim
2020		Salzwedel - alemanha 3,6 ha	Ciel et Terre	750 kWp 1.944 módulos (SUNTECH)	Sim
2020		Don Sai - Tailândia 4,8 ha	Ciel et Terre	1.987,59 kWp 6.023 módulos (RISEN)	Sim
2020		Veldhunten - Holanda 5,6 ha	Ciel et Terre	1.098 kWp 4.480 módulos (245 Wo KYOCERA)	Sim
2020		Boskoop FPV - Holanda	Seaflex	3.400 kWp	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2020		Southeast Asia I - China	Sungrow	13.000 kWp	Sim
2020		Southeast Asia II - China	Sungrow	70.000 kWp	Sim
2020		Southeast Asia III - China	Sungrow	12.500 kWp	Sim
2020		Tongcheng Anqing - China	Sungrow	20.000 kWp	Sim
2020		Thoothukudi - Índia 15,6 ha	Ciel et Terre	14.800 kWp 37.632 módulos (JINKO)	Sim
2020		Windsor - EUA 7,4 ha	Ciel et Terre	1785,64 kWp 4.959 módulos (RISEN)	Sim
2020		Gongguan - Taiwan 6 ha	Ciel et Terre	4.268,88 kWp 11.484 módulos	Sim
2020		Changbing - Taiwan 86,16 ha	Ciel et Terre	88.038,76 kWp 279.488 módulos	Sim
2020		Jiali - Taiwan 1,65 ha	Ciel et Terre	1.261,72 kWp 3.294 módulos (ANJI)	Sim
2020		Leimeshein - Alemanha 15,5 ha	Ciel et Terre	1.498,5 kWp 4.165 módulos	Sim

Ano	Imagem	Localização, área	Empresa responsável	Potência instalada	On-grid
2020		City of Altamonte Spring - EUA 1,27 ha	Ciel et Terre	962,6 kWp 2.437 módulos (ZNSHINE)	Sim
2021		Healdburg Pond - EUA 15,3 ha	Ciel et Terre	4.780 kWp 11.660 módulos (ET SOLAR)	Sim
2021		Itumbiara, GO - Brasil	Furnas	200,03 kWp 512 módulos (Trina Solar)	Sim
2021		Sierra Brava FPV - Espanha	Seaflex	1.115 kWp 3.000 módulos	Sim
2022		Dezhou - China	Huaneng International	320.000 kWp	Sim
2022		Wenzhou - China	Chint Group	550.000 kWp 1,4 milhões de módulos de 450 Wp (bifaciais)	Sim

Fonte: elaboração própria a partir de Strangueto (2016), Ciel et Terre (2021), Seaflex (2021), Infratech Industries (2021), Times of Malta (2021), Sungrow (2021), PV-Magazine (2022) e Ecoinventos (2022).

**ANEXO B – Folha de dados do módulo fotovoltaico do projeto**

Mono Multi Solutions

# THE TALLMAX<sup>M</sup> PLUS<sup>+</sup>

FRAMED 144 HALF-CELL MODULE



**144-Cell MONOCRYSTALLINE MODULE**

**345-395W POWER OUTPUT RANGE**

**19.9% MAXIMUM EFFICIENCY**

**0~+5W POSITIVE POWER TOLERANCE**

PRODUCTS	COLOR OF FRAME	POWER RANGE
TSM-DE14H(J)	Silver	345-395W
TSM-DE14H(OB)(J)	Black	345-395W

**Increased value**

- Reduce BOS cost with high power bin and 1500V system voltage
- Low thermal coefficients for greater energy production at higher temperature

**Half-cell design brings higher efficiency**

- New cell string layout and split J-box location to reduce the energy loss caused by inter-row shading
- Integrated LRF (Light Redirecting Film) to enhance power, specially for ground-mount applications
- Lower cell connection power losses due to half-cell layout (144 monocrystalline)

**Highly reliable due to stringent quality control**

- Over 30 in-house tests (UV, TC, HF etc)
- Increased module robustness to minimize micro-cracks
- PID resistant and free of snail trails
- Internal test requirement of Trina more stringent than certification authority

**Certified to withstand the most challenging environmental conditions**

- 2400 Pa negative load
- 5400 Pa positive load

**Comprehensive Products And System Certificates**

IEC61215/UL1703/IEC61730/IEC61701/IEC62716  
 ISO 9001: Quality Management System  
 ISO 14001: Environmental Management System  
 ISO 14054: Greenhouse gases Emissions Verification  
 OHSAS 18001: Occupation Health and Safety Management System










**LINEAR PERFORMANCE WARRANTY**

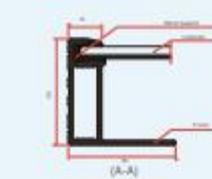
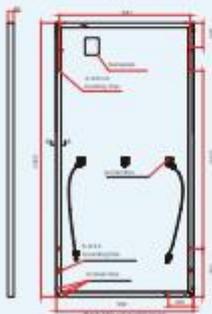
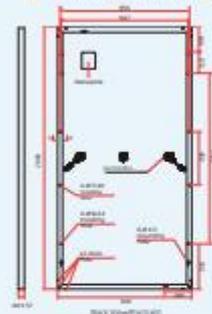
10 Year Product Warranty · 25 Year Linear Power Warranty



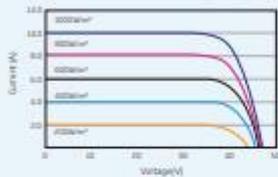
Year	Trina Standard (%)	Industry Standard (%)
0	100	100
5	98.5	98.5
10	97	97
15	95.5	95.5
20	94	94
25	92.5	92.5



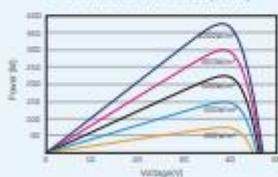
DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)



I-V CURVES OF PV MODULE(375W)



P-V CURVES OF PV MODULE(375W)



ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts - P <sub>max</sub> (Wp)*	345	350	355	360	365	370	375	380	385	390	395
Power Output Tolerance - P <sub>max</sub> (W)	0 - +5										
Maximum Power Voltage - V <sub>mp</sub> (V)	38.2	38.4	38.6	38.8	39.0	39.2	39.4	39.6	40.1	40.5	40.8
Maximum Power Current - I <sub>mp</sub> (A)	9.04	9.13	9.21	9.28	9.37	9.44	9.52	9.60	9.61	9.64	9.69
Open Circuit Voltage - V <sub>oc</sub> (V)	46.3	46.5	46.9	47.2	47.4	47.6	47.8	48.0	48.5	49.7	50.1
Short Circuit Current - I <sub>sc</sub> (A)	9.55	9.60	9.68	9.73	9.83	9.88	9.93	9.99	10.03	10.08	10.13
Module Efficiency η <sub>p</sub> (%)	17.4	17.6	17.9	18.1	18.4	18.6	18.9	19.2	19.4	19.7	19.9

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 25°C, Air Mass 1.5  
\*Measuring tolerance: ±2%

ELECTRICAL DATA (NOCT)

Maximum Power - P <sub>max</sub> (Wp)	257	261	265	268	272	276	280	284	287	291	295
Maximum Power Voltage - V <sub>mp</sub> (V)	35.4	35.7	35.9	36.2	36.3	36.6	36.9	37.1	37.4	37.9	38.3
Maximum Power Current - I <sub>mp</sub> (A)	7.26	7.32	7.38	7.42	7.49	7.54	7.59	7.64	7.67	7.68	7.74
Open Circuit Voltage - V <sub>oc</sub> (V)	43.2	43.3	43.7	44.0	44.2	44.4	44.5	44.7	45.2	46.3	46.5
Short Circuit Current - I <sub>sc</sub> (A)	7.71	7.75	7.82	7.86	7.94	7.98	8.02	8.07	8.10	8.14	8.17

NOCT: Irradiance at 800W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s

MECHANICAL DATA

Solar Cells	Monocrystalline 156.75 × 78.375 mm (6.17 × 3.09 inches)
Cell Orientation	144 cells (6 × 24)
Module Dimensions	2000 × 992 × 40 mm (78.74 × 39.06 × 1.57 inches)
Weight	23 kg (50.7 lb)
Glass	3.2 mm (0.13 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant Material	EVA (White/Transparent)
Backsheet	White
Frame	40 mm (1.57 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm <sup>2</sup> (0.006 inches <sup>2</sup> ), Portrait: N 140mm/P 285mm (5.51/11.22 inches) Landscape: N 1400mm/P 1400mm (55.12/55.12 inches)
Connector	TS4

TEMPERATURE RATINGS

NOCT (nominal operating cell temperature)	44°C (±2°C)
Temperature Coefficient of P <sub>max</sub>	-0.37%/°C
Temperature Coefficient of V <sub>oc</sub>	-0.29%/°C
Temperature Coefficient of I <sub>sc</sub>	0.05%/°C

(DO NOT connect Fuse in Combiner Box with two or more strings in parallel connection)

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40 - +85°C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC) 1500V DC (UL)
Max Series Fuse Rating	20A

WARRANTY

- 10 year Product Workmanship Warranty
  - 25 year Linear Power Warranty
- (Please refer to product warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

- Modules per box: 27 pieces
- Modules per 40' container: 594 pieces



CAUTION: READ SAFETY AND INSTALLATION INSTRUCTIONS BEFORE USING THE PRODUCT.  
© 2018 Trina Solar Limited. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.  
Version number: TSM\_DE14H(I)\_EN\_2019\_B [www.trinasolar.com](http://www.trinasolar.com)

## ANEXO C – Folha de dados do inversor fotovoltaico do projeto

### SUNNY HIGHPOWER PEAK1





**Efficient**

- Superior power density: 75 kW with only 77 kg of weight
- Max. yield thanks to possible DC/AC ratio of 150%

**Reliable**

- Superior PV system availability with 75 kW units
- SMA Inverter Manager as central control unit

**Flexible**

- DC input voltage of up to 1000 V
- Flexible DC solutions with customer-specific PV array combiner boxes

**Innovative**

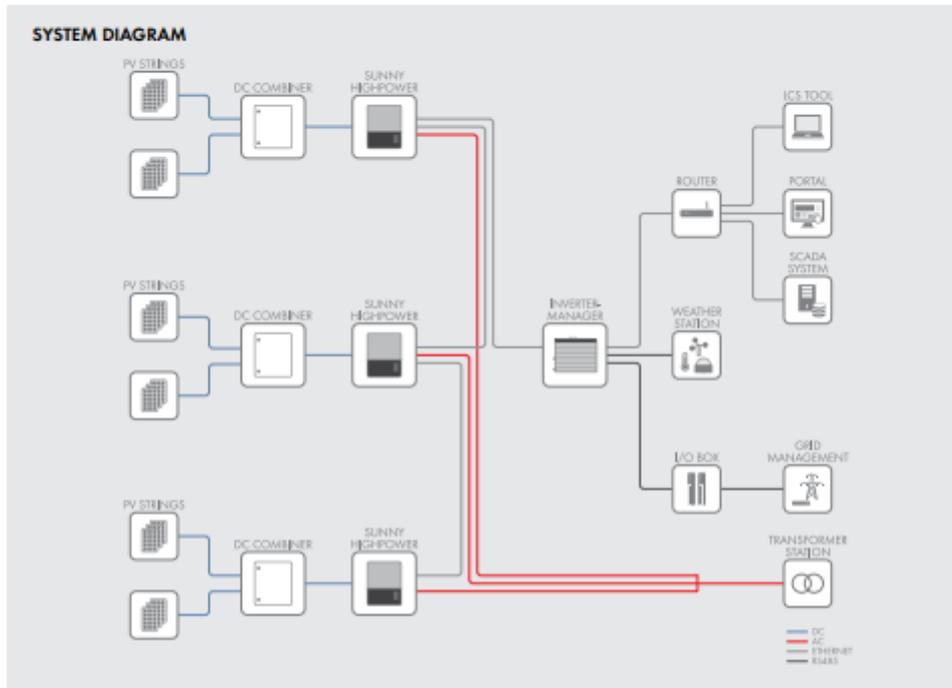
- Cutting-edge system design
- Innovative active cooling concept

### SUNNY HIGHPOWER PEAK1

The Best of Two Worlds

The new Sunny Highpower PEAK1 is part of an innovative global system solution for commercial and industrial PV systems. This solution combines the advantages of a decentralized system layout with the benefits of centralized inverter designs in order to get the best of two worlds. High efficiency, flexible system design, easy installation, simple commissioning and low maintenance requirements contribute decisively to reducing the operating costs for the entire system.

## SUNNY HIGHPOWER PEAK1



Technical Data	SMA Inverter Manager
<b>Voltage supply</b>	
Input voltage	9 to 36 Vdc
Power consumption	< 20 W
<b>General data</b>	
Dimensions (W/H/D)	160 / 125 / 49 mm (6.3 / 4.9 / 1.9 inches)
Weight	940 g (2 lbs)
Maximum allowed number of inverters	42
Degree of protection	IP21
Mounting	DIN top-hat rails or wall mounting
Operating temperature range	-40 °C to +85 °C [-40° F to +185° F]
Relative humidity (non-condensing)	5 % to 95 %
<b>Interfaces</b>	
PC user interface	ICS tool
Sensor interface / protocol	RS485 / Modbus RTU for Sunspec Alliance compatible weather station
Interface to inverter	1 Ethernet port (RJ45)
Interface for external network / protocol	1 Ethernet port (RJ45) / Modbus TCP, SunSpec Alliance
Interface to remote control	6 x DI via external SMA Digital I/O Box
Certificates and approvals (more available upon request)	UL 508, UL 60950-1, CSA C22.2 No. 60950-1-07, EN 55022 Class A, EN 60950-1, EN 61000-3-2 Class D, EN 61000-3-3, EN 61000-6-2, EN 61000-6-4, EN 55024, FCC Part 15, Subpart B Class A
SMA Inverter Manager type designation	IM-20
SMA Digital I/O Box type designation	IM-DIO-10



## FLEXIBLE SYSTEM DESIGN

### With Maximum Efficiency

The new SMA system solution consists of four components: highly efficient inverters, the flexible combiner boxes, the central SMA Inverter Manager and the LCS commissioning tool. It is precisely this systemized approach that makes the Sunny Highpower PEAK1 so unique and guarantees a high level of performance along with maximum flexibility in system planning and design.

#### **Sunny Highpower PEAK1 inverters with impressive design**

No other inverter weighing only 77 kg with an output of 75 kW offers this. With its compact design, the Sunny Highpower PEAK1 requires little space, reduces on-site preparation work, simplifies installation and lowers maintenance costs.

#### **Innovative system management with the SMA Inverter Manager**

The SMA Inverter Manager is the central communications component and sole interface for controlling the entire system. It handles all the important inverter and system management functions for up to 42 inverters in one system (up to 3.15 MW). Based on Modbus TCP (SunSpec Alliance) Communication, it can be easily integrated into a larger communication system. Moreover, the SMA Inverter Manager provides grid management functions and exchanges data with the grid operator.

#### **Easy commissioning with the LCS commissioning tool**

The specially developed LCS tool (Local Commissioning and Service) makes commissioning easy, saves time and reduces costs. The inverter is configured by simply selecting the system-specific configuration files and then transmitting them to all inverters. Furthermore, by reading the status, current values and incidents at the inverter level can make troubleshooting and bug-fixing considerably easier.

#### **External combiner box for flexible system design**

The module strings are connected to the inverters using the external combiner boxes.\* This allows the system to flexibly adapt to various regional standards and the generator configuration. This new design decisively contributes to reducing system costs.

\* Different configurations can be delivered upon request

[www.SMA-Solar.com](http://www.SMA-Solar.com)

SMA Solar Technology

SMP 01/2019/01/2019 Based on IEC paper 48 products and services described in this document are subject to change upon the issuance of revised product documents or engineering change orders. SMA reserves the right to change without notice. No content shall be construed as a warranty, guarantee or other promise. SMA Solar Technology AG, Solingen, Germany. SMA Solar Technology AG, Solingen, Germany. SMA Solar Technology AG, Solingen, Germany.

### ANEXO D - Radiação solar para cada dia do ano em kWh/m<sup>2</sup>/dia na região de Itumbiara

A partir da latitude de Itumbiara ( $\phi = 18,423611^\circ$ ) foi calculado através da metodologia de Honsberg; Bowden (2019) a radiação solar para a inclinação dos módulos da usina de solo (módulos a  $14^\circ$ ) e para usina flutuante (módulo a  $22^\circ$ ) para que pudesse ser realizada a comparação na mesma base, equiparando a produção de energia. O ANEXO D apresenta os resultados da radiação nestes panoramas.

<b>Dia do ano</b>	<b>Incidente</b>	<b>Horizontal</b>	<b>Módulo 22°</b>	<b>Módulo 14°</b>	<b><math>\alpha</math> (graus)</b>
1	9,768	9,737	8,735	9,259	94,61
2	9,766	9,736	8,739	9,261	94,53
3	9,764	9,734	8,743	9,263	94,44
4	9,761	9,733	8,747	9,265	94,35
5	9,759	9,732	8,752	9,268	94,25
6	9,756	9,731	8,758	9,271	94,14
7	9,754	9,729	8,764	9,274	94,02
8	9,751	9,728	8,770	9,278	93,90
9	9,749	9,727	8,777	9,282	93,77
10	9,746	9,726	8,784	9,286	93,64
11	9,744	9,726	8,792	9,291	93,50
12	9,742	9,725	8,800	9,296	93,35
13	9,739	9,724	8,809	9,301	93,20
14	9,737	9,722	8,817	9,306	93,04
15	9,734	9,721	8,826	9,312	92,87
16	9,731	9,720	8,836	9,317	92,70
17	9,728	9,718	8,845	9,323	92,52
18	9,725	9,716	8,855	9,328	92,33
19	9,721	9,714	8,865	9,334	92,14
20	9,717	9,711	8,875	9,339	91,94
21	9,714	9,709	8,885	9,345	91,74
22	9,710	9,706	8,895	9,350	91,53
23	9,705	9,702	8,905	9,356	91,31
24	9,701	9,699	8,916	9,361	91,09
25	9,696	9,695	8,926	9,366	90,86
26	9,691	9,690	8,936	9,371	90,63
27	9,686	9,686	8,947	9,376	90,39
28	9,681	9,680	8,957	9,381	90,15
29	9,675	9,675	8,967	9,386	89,90
30	9,669	9,669	8,978	9,390	89,64

31	9,663	9,662	8,988	9,394	89,38
32	9,656	9,655	8,998	9,398	89,12
33	9,649	9,648	9,008	9,402	88,85
34	9,642	9,640	9,017	9,405	88,57
35	9,635	9,632	9,027	9,408	88,29
36	9,627	9,622	9,036	9,410	88,00
37	9,619	9,613	9,045	9,412	87,71
38	9,611	9,602	9,053	9,414	87,42
39	9,602	9,592	9,062	9,415	87,12
40	9,593	9,580	9,069	9,416	86,81
41	9,583	9,568	9,077	9,416	86,50
42	9,574	9,555	9,084	9,416	86,19
43	9,563	9,541	9,091	9,416	85,87
44	9,553	9,527	9,097	9,414	85,55
45	9,542	9,511	9,103	9,412	85,22
46	9,530	9,495	9,108	9,410	84,89
47	9,518	9,479	9,112	9,406	84,55
48	9,506	9,461	9,116	9,402	84,22
49	9,493	9,443	9,120	9,398	83,87
50	9,479	9,423	9,122	9,392	83,53
51	9,466	9,403	9,124	9,386	83,18
52	9,451	9,382	9,126	9,379	82,83
53	9,436	9,360	9,126	9,371	82,47
54	9,421	9,337	9,126	9,363	82,11
55	9,405	9,314	9,125	9,353	81,75
56	9,388	9,289	9,123	9,343	81,38
57	9,371	9,263	9,121	9,331	81,01
58	9,354	9,236	9,117	9,319	80,64
59	9,335	9,208	9,112	9,306	80,27
60	9,316	9,180	9,107	9,292	79,89
61	9,297	9,150	9,101	9,277	79,51
62	9,277	9,119	9,093	9,260	79,13
63	9,256	9,087	9,085	9,243	78,75
64	9,235	9,054	9,076	9,225	78,36
65	9,213	9,021	9,066	9,206	77,98
66	9,191	8,986	9,054	9,186	77,59
67	9,168	8,950	9,042	9,165	77,20
68	9,144	8,913	9,029	9,143	76,80
69	9,120	8,876	9,015	9,120	76,41
70	9,096	8,838	9,001	9,096	76,01
71	9,072	8,799	8,985	9,072	75,62

72	9,047	8,760	8,969	9,047	75,22
73	9,023	8,720	8,953	9,022	74,82
74	8,998	8,680	8,937	8,996	74,42
75	8,975	8,641	8,920	8,971	74,02
76	8,953	8,602	8,905	8,947	73,62
77	8,932	8,565	8,890	8,923	73,21
78	8,913	8,529	8,877	8,902	72,81
79	8,896	8,494	8,866	8,882	72,41
80	8,882	8,462	8,857	8,863	72,00
81	8,868	8,430	8,848	8,846	71,60
82	8,855	8,397	8,838	8,827	71,20
83	8,841	8,364	8,828	8,808	70,79
84	8,826	8,330	8,817	8,789	70,39
85	8,812	8,295	8,805	8,768	69,99
86	8,797	8,260	8,792	8,747	69,58
87	8,781	8,224	8,778	8,725	69,18
88	8,766	8,188	8,764	8,702	68,78
89	8,750	8,151	8,749	8,678	68,38
90	8,733	8,113	8,733	8,654	67,98
91	8,717	8,075	8,717	8,629	67,58
92	8,700	8,036	8,699	8,604	67,19
93	8,682	7,997	8,681	8,577	66,79
94	8,664	7,957	8,662	8,550	66,40
95	8,646	7,917	8,643	8,523	66,00
96	8,628	7,876	8,622	8,494	65,61
97	8,609	7,835	8,601	8,465	65,22
98	8,590	7,793	8,579	8,436	64,84
99	8,571	7,751	8,557	8,405	64,45
100	8,551	7,708	8,533	8,375	64,07
101	8,531	7,665	8,510	8,343	63,69
102	8,510	7,622	8,485	8,311	63,31
103	8,489	7,578	8,460	8,279	62,93
104	8,468	7,534	8,434	8,246	62,56
105	8,447	7,490	8,407	8,212	62,19
106	8,425	7,445	8,380	8,178	61,82
107	8,403	7,400	8,353	8,143	61,45
108	8,381	7,355	8,325	8,108	61,09
109	8,358	7,310	8,296	8,073	60,73
110	8,335	7,264	8,266	8,037	60,37
111	8,312	7,218	8,237	8,001	60,02
112	8,289	7,173	8,206	7,964	59,67

113	8,265	7,127	8,176	7,928	59,33
114	8,241	7,081	8,145	7,890	58,98
115	8,217	7,035	8,113	7,853	58,65
116	8,193	6,989	8,081	7,815	58,31
117	8,168	6,943	8,049	7,778	57,98
118	8,143	6,897	8,017	7,739	57,65
119	8,118	6,851	7,984	7,701	57,33
120	8,093	6,806	7,951	7,663	57,01
121	8,068	6,760	7,918	7,625	56,70
122	8,043	6,715	7,885	7,587	56,39
123	8,018	6,670	7,851	7,548	56,08
124	7,993	6,625	7,818	7,510	55,78
125	7,968	6,581	7,784	7,472	55,49
126	7,943	6,537	7,751	7,434	55,20
127	7,918	6,494	7,718	7,397	54,91
128	7,893	6,451	7,685	7,360	54,63
129	7,869	6,409	7,652	7,323	54,35
130	7,845	6,367	7,620	7,286	54,08
131	7,821	6,326	7,588	7,251	53,82
132	7,798	6,286	7,557	7,215	53,56
133	7,775	6,246	7,526	7,181	53,30
134	7,753	6,208	7,496	7,147	53,05
135	7,731	6,171	7,466	7,114	52,81
136	7,711	6,134	7,438	7,082	52,57
137	7,691	6,099	7,410	7,051	52,34
138	7,672	6,065	7,384	7,022	52,11
139	7,654	6,033	7,358	6,993	51,89
140	7,638	6,001	7,334	6,966	51,67
141	7,622	5,971	7,311	6,940	51,46
142	7,608	5,943	7,290	6,915	51,26
143	7,595	5,916	7,269	6,892	51,06
144	7,583	5,889	7,250	6,870	50,87
145	7,571	5,864	7,231	6,849	50,68
146	7,560	5,840	7,213	6,828	50,50
147	7,549	5,817	7,196	6,808	50,33
148	7,539	5,795	7,179	6,789	50,16
149	7,529	5,773	7,163	6,770	50,00
150	7,519	5,752	7,147	6,752	49,85
151	7,509	5,731	7,132	6,735	49,70
152	7,500	5,712	7,117	6,718	49,56
153	7,491	5,693	7,103	6,702	49,43

154	7,483	5,675	7,089	6,686	49,30
155	7,475	5,658	7,076	6,672	49,18
156	7,467	5,642	7,063	6,658	49,06
157	7,460	5,627	7,052	6,644	48,95
158	7,453	5,612	7,040	6,632	48,85
159	7,446	5,598	7,030	6,620	48,76
160	7,440	5,586	7,020	6,609	48,67
161	7,434	5,574	7,011	6,598	48,59
162	7,429	5,563	7,002	6,589	48,51
163	7,424	5,553	6,994	6,580	48,45
164	7,419	5,543	6,987	6,572	48,39
165	7,415	5,535	6,980	6,564	48,33
166	7,411	5,528	6,975	6,558	48,29
167	7,408	5,521	6,970	6,552	48,25
168	7,406	5,516	6,965	6,548	48,21
169	7,403	5,512	6,962	6,544	48,19
170	7,402	5,508	6,959	6,541	48,17
171	7,400	5,505	6,957	6,538	48,16
172	7,400	5,504	6,956	6,537	48,15
173	7,399	5,503	6,955	6,536	48,15
174	7,399	5,503	6,955	6,536	48,16
175	7,400	5,504	6,956	6,537	48,18
176	7,401	5,507	6,958	6,539	48,20
177	7,402	5,510	6,960	6,542	48,23
178	7,404	5,514	6,964	6,546	48,26
179	7,407	5,519	6,967	6,550	48,31
180	7,410	5,525	6,972	6,555	48,36
181	7,413	5,531	6,978	6,561	48,42
182	7,417	5,539	6,984	6,568	48,48
183	7,421	5,548	6,990	6,576	48,55
184	7,426	5,558	6,998	6,584	48,63
185	7,431	5,568	7,006	6,593	48,71
186	7,437	5,579	7,015	6,603	48,80
187	7,443	5,592	7,025	6,614	48,90
188	7,449	5,605	7,035	6,626	49,01
189	7,456	5,619	7,046	6,638	49,12
190	7,463	5,634	7,057	6,651	49,24
191	7,471	5,650	7,070	6,665	49,36
192	7,479	5,667	7,082	6,679	49,49
193	7,487	5,684	7,096	6,694	49,63
194	7,496	5,702	7,110	6,710	49,77

195	7,505	5,721	7,124	6,726	49,93
196	7,514	5,741	7,139	6,744	50,08
197	7,524	5,762	7,155	6,761	50,25
198	7,534	5,784	7,171	6,780	50,42
199	7,544	5,806	7,188	6,799	50,59
200	7,555	5,829	7,205	6,818	50,78
201	7,565	5,852	7,222	6,838	50,96
202	7,577	5,877	7,240	6,859	51,16
203	7,589	5,902	7,259	6,881	51,36
204	7,601	5,929	7,279	6,904	51,57
205	7,615	5,957	7,300	6,928	51,78
206	7,630	5,986	7,323	6,953	52,00
207	7,646	6,017	7,346	6,979	52,22
208	7,663	6,049	7,371	7,007	52,45
209	7,681	6,082	7,397	7,036	52,69
210	7,701	6,117	7,424	7,067	52,93
211	7,721	6,152	7,452	7,098	53,18
212	7,742	6,189	7,481	7,130	53,43
213	7,764	6,227	7,511	7,164	53,69
214	7,786	6,266	7,541	7,198	53,95
215	7,809	6,306	7,572	7,233	54,22
216	7,833	6,346	7,604	7,268	54,49
217	7,857	6,388	7,636	7,304	54,77
218	7,881	6,430	7,669	7,341	55,05
219	7,906	6,472	7,701	7,378	55,34
220	7,930	6,515	7,735	7,416	55,64
221	7,955	6,559	7,768	7,453	55,93
222	7,980	6,603	7,801	7,491	56,24
223	8,006	6,648	7,835	7,529	56,54
224	8,031	6,692	7,868	7,567	56,86
225	8,056	6,737	7,901	7,606	57,17
226	8,081	6,783	7,934	7,644	57,49
227	8,106	6,828	7,967	7,682	57,82
228	8,131	6,874	8,000	7,720	58,15
229	8,156	6,920	8,033	7,759	58,48
230	8,180	6,966	8,065	7,796	58,81
231	8,205	7,012	8,097	7,834	59,15
232	8,229	7,058	8,129	7,872	59,50
233	8,253	7,104	8,160	7,909	59,85
234	8,277	7,150	8,191	7,946	60,20
235	8,300	7,195	8,222	7,983	60,55

236	8,324	7,241	8,252	8,019	60,91
237	8,347	7,287	8,281	8,055	61,27
238	8,370	7,332	8,310	8,091	61,63
239	8,392	7,377	8,339	8,126	62,00
240	8,414	7,422	8,367	8,161	62,37
241	8,436	7,467	8,394	8,195	62,74
242	8,458	7,512	8,421	8,229	63,12
243	8,479	7,556	8,447	8,262	63,50
244	8,500	7,600	8,472	8,295	63,88
245	8,521	7,643	8,497	8,327	64,26
246	8,541	7,687	8,522	8,359	64,64
247	8,561	7,730	8,545	8,390	65,03
248	8,580	7,772	8,568	8,421	65,42
249	8,600	7,814	8,590	8,451	65,81
250	8,619	7,855	8,612	8,480	66,20
251	8,637	7,897	8,632	8,509	66,59
252	8,655	7,937	8,652	8,537	66,99
253	8,673	7,977	8,672	8,564	67,38
254	8,691	8,017	8,690	8,591	67,78
255	8,708	8,056	8,708	8,617	68,18
256	8,725	8,094	8,725	8,642	68,58
257	8,742	8,132	8,741	8,666	68,98
258	8,758	8,170	8,757	8,690	69,38
259	8,774	8,206	8,771	8,713	69,79
260	8,789	8,242	8,785	8,736	70,19
261	8,804	8,278	8,798	8,757	70,59
262	8,819	8,313	8,811	8,778	70,99
263	8,834	8,347	8,822	8,798	71,40
264	8,848	8,381	8,833	8,818	71,80
265	8,862	8,413	8,843	8,837	72,21
266	8,875	8,446	8,852	8,855	72,61
267	8,889	8,478	8,861	8,872	73,01
268	8,904	8,511	8,872	8,891	73,41
269	8,922	8,546	8,884	8,912	73,82
270	8,942	8,583	8,897	8,935	74,22
271	8,964	8,621	8,913	8,959	74,62
272	8,987	8,661	8,929	8,984	75,02
273	9,010	8,700	8,945	9,009	75,42
274	9,035	8,740	8,961	9,034	75,82
275	9,059	8,779	8,977	9,059	76,21
276	9,084	8,818	8,993	9,084	76,61

277	9,108	8,857	9,008	9,108	77,00
278	9,132	8,895	9,022	9,131	77,39
279	9,156	8,932	9,036	9,154	77,78
280	9,179	8,968	9,049	9,175	78,17
281	9,202	9,003	9,060	9,196	78,56
282	9,224	9,038	9,071	9,216	78,94
283	9,246	9,071	9,081	9,234	79,32
284	9,267	9,103	9,089	9,252	79,70
285	9,287	9,135	9,097	9,269	80,08
286	9,307	9,165	9,104	9,284	80,46
287	9,326	9,194	9,110	9,299	80,83
288	9,345	9,222	9,115	9,313	81,20
289	9,362	9,250	9,119	9,325	81,57
290	9,380	9,276	9,122	9,337	81,93
291	9,397	9,301	9,124	9,348	82,29
292	9,413	9,326	9,126	9,358	82,65
293	9,429	9,349	9,126	9,367	83,00
294	9,444	9,371	9,126	9,375	83,35
295	9,458	9,393	9,125	9,383	83,70
296	9,473	9,414	9,124	9,389	84,05
297	9,486	9,433	9,121	9,395	84,39
298	9,499	9,452	9,118	9,400	84,72
299	9,512	9,470	9,114	9,404	85,05
300	9,524	9,487	9,110	9,408	85,38
301	9,536	9,504	9,105	9,411	85,71
302	9,547	9,519	9,100	9,413	86,03
303	9,558	9,534	9,094	9,415	86,34
304	9,569	9,548	9,087	9,416	86,66
305	9,579	9,561	9,081	9,416	86,96
306	9,588	9,574	9,073	9,416	87,27
307	9,598	9,586	9,066	9,416	87,56
308	9,606	9,597	9,057	9,415	87,86
309	9,615	9,608	9,049	9,413	88,15
310	9,623	9,618	9,040	9,411	88,43
311	9,631	9,627	9,031	9,409	88,71
312	9,639	9,636	9,022	9,406	88,98
313	9,646	9,644	9,012	9,403	89,25
314	9,653	9,652	9,003	9,400	89,51
315	9,660	9,659	8,993	9,396	89,77
316	9,666	9,666	8,983	9,392	90,02
317	9,672	9,672	8,973	9,388	90,27

318	9,678	9,678	8,962	9,383	90,51
319	9,683	9,683	8,952	9,379	90,75
320	9,689	9,688	8,942	9,374	90,98
321	9,694	9,693	8,931	9,369	91,20
322	9,698	9,697	8,921	9,364	91,42
323	9,703	9,701	8,910	9,358	91,63
324	9,707	9,704	8,900	9,353	91,84
325	9,712	9,707	8,890	9,347	92,04
326	9,716	9,710	8,880	9,342	92,24
327	9,719	9,713	8,870	9,336	92,42
328	9,723	9,715	8,860	9,331	92,61
329	9,726	9,717	8,850	9,325	92,78
330	9,729	9,719	8,840	9,320	92,95
331	9,732	9,720	8,831	9,314	93,12
332	9,735	9,722	8,822	9,309	93,27
333	9,738	9,723	8,813	9,304	93,43
334	9,741	9,724	8,804	9,299	93,57
335	9,743	9,725	8,796	9,294	93,71
336	9,745	9,726	8,788	9,289	93,84
337	9,748	9,727	8,780	9,284	93,96
338	9,750	9,728	8,773	9,280	94,08
339	9,752	9,729	8,767	9,276	94,19
340	9,755	9,730	8,761	9,272	94,30
341	9,757	9,731	8,755	9,269	94,40
342	9,760	9,732	8,750	9,266	94,49
343	9,762	9,734	8,745	9,264	94,57
344	9,765	9,735	8,741	9,262	94,65
345	9,767	9,736	8,737	9,260	94,72
346	9,769	9,738	8,734	9,258	94,78
347	9,771	9,739	8,731	9,256	94,84
348	9,773	9,740	8,728	9,255	94,89
349	9,775	9,741	8,726	9,254	94,94
350	9,777	9,742	8,724	9,253	94,97
351	9,778	9,742	8,722	9,252	95,00
352	9,779	9,743	8,721	9,252	95,02
353	9,780	9,744	8,720	9,251	95,04
354	9,780	9,744	8,719	9,251	95,05
355	9,781	9,744	8,719	9,251	95,05
356	9,781	9,744	8,719	9,251	95,04
357	9,780	9,744	8,719	9,251	95,03
358	9,780	9,744	8,719	9,251	95,01

359	9,779	9,743	8,720	9,251	94,99
360	9,778	9,743	8,721	9,252	94,95
361	9,777	9,742	8,723	9,253	94,91
362	9,776	9,741	8,725	9,253	94,87
363	9,774	9,740	8,727	9,255	94,81
364	9,772	9,739	8,729	9,256	94,75
365	9,770	9,738	8,732	9,257	94,69

Fonte: elaboração própria através de HONSBURG; BOWDEN (2019).