



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PEDRO HIGOR SOUSA GUEDES

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA FLUTUANTE NA
BARRAGEM DA HIDROELÉTRICA DE BOA ESPERANÇA - PI**

FORTALEZA

2023

PEDRO HIGOR SOUSA GUEDES

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA FLUTUANTE NA
BARRAGEM DA HIDROELÉTRICA DE BOA ESPERANÇA - PI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Coorientador: Eng. Me. Breno Bezerra Freitas

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- G958p Guedes, Pedro Higor Sousa.
Potencial de geração de uma usina fotovoltaica flutuante na barragem da Hidroelétrica de Boa Esperança - PI / Pedro Higor Sousa Guedes. – 2023.
83 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
1. Solar fotovoltaica. 2. Fotovoltaica flutuante. 3. Geração de eletricidade. 4. Usina hidroelétrica. I.
Título.

CDD 621.3

PEDRO HIGOR SOUSA GUEDES

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA FLUTUANTE NA
BARRAGEM DA HIDROELÉTRICA DE BOA ESPERANÇA - PI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Me. Breno Bezerra Freitas (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À Nossa Senhora.

Aos meus pais, Orlando e Ireuda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me ter criado e, com amor e paciência, me levado até onde estou, sabendo que ainda tenho muito a percorrer.

À Virgem Maria, que desde o ventre me guarda com carinho, qual boa mãe a me socorrer nas diversas necessidades.

Aos meus pais, Ireuda e Orlando, que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões e me proporcionaram maneiras de me desenvolver como indivíduo e engenheiro.

À minha irmã mais velha, Marina, que sempre esteve presente em todos os momentos de minha vida, rezando e torcendo por mim.

Ao meu orientador, Prof. Paulo Carvalho, que com muita paciência me auxiliou na construção deste trabalho, bem como ao meu coorientador, Eng. Breno Freitas, que sempre se mostrou solícito e compassivo em minhas várias dúvidas e questionamentos.

Ao colega de pesquisa Janiere Souza, que contribuiu diretamente com este TCC.

Ao Prof. Fernando Antunes, que com muito prontidão aceitou o convite para fazer parte da banca examinadora.

À Tecsys Jr., que me proporcionou uma experiência empresarial já na graduação, e por todas as pessoas que aí pude conhecer, nomeando aqui o presidente da minha época e os que faziam parte da minha diretoria: Davi Mendes, Letícia Vasconcelos e Pedro Henrique.

À Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará, em especial à Coordenadoria de Energia e Telecomunicações (Coete) que, no ano de 2022, foi meu local de trabalho e de grande desenvolvimento profissional e humano. Aqui agradeço à minha equipe de trabalho: Gabriel Marçal, Patrícia, Maria, Gerlene, Luciana, Marciano, Paulo, Rumana, Natália e Jerffson.

À cada professor e aluno da graduação com que pude interagir durante estes anos na UFC, nomeando aqui alguns que marcaram de diversas formas minha trajetória: Wesley Barata, Daniel Jaguaribe, Bruno Wendell, Andreza Maranhão, Prof. Sérgio Daher, Prof. Raimundo Furtado, Prof. Carlos Gustavo Castelo Branco dentre outros.

Aos meus amigos que me acompanharam durante todos estes anos, os quais puderam ver minhas lutas e alegrias neste curso, em especial ao Felipe Moreira que não poucas vezes cedeu sua residência para que pudesse fazer trabalhos.

Aos meus irmãos das casas de formação dos seminários da Arquidiocese de Fortaleza e aos meus Padres formadores, em especial ao Pe. Vicente, que me possibilitou o ingresso no seminário enquanto terminava este curso, Pe. José Carlos e Pe. Otaviano.

“Obrigado. Perdão. Ajuda-me mais.” (Beato Álvaro Del Portillo)

“Tudo o que temos que decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado.” (Gandalf – Senhor dos Anéis: A Sociedade do Anel)

RESUMO

O crescimento da demanda por energia limpa e renovável é notório em diversos países do mundo, tendo em vista os projetos globais de redução das emissões de carbono e melhor aproveitamento dos recursos naturais da Terra. Neste sentido, as projeções internacionais indicam que os sistemas fotovoltaicos (FV) atingirão a maior potência instalada entre os tipos de geração elétrica do Mundo até 2050. Para corroborar com este cenário, os sistemas fotovoltaicos flutuantes (FVF) têm se apresentado como uma ótima alternativa para diversos países, tendo em vista os inúmeros benefícios, como o aumento na eficiência da geração e a redução da evaporação do corpo d'água onde este esteja instalado. No Brasil, estudos já demonstram o potencial de geração deste tipo de sistema FV. No Nordeste, por exemplo, há muitos espelhos d'água que proporcionam a locação dos módulos FV em flutuadores. Como forma de contribuição para a sociedade, o presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo identificar o potencial de geração FV para uma usina FVF instalada na barragem da Usina Hidroelétrica (UHE) de Boa Esperança, na qual é considerada uma área útil de 248,30 km². Neste contexto, através dos dados da UHE em questão, os quais estão disponíveis nos sites do Operador Nacional do Sistema (ONS) e da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), são feitos comparativos com os resultados obtidos para as usinas FVF. Assim sendo, são propostos seis cenários, em que os três primeiros fazem referência às instalações com módulos fotovoltaicos de 480 Wp e os outros estão relacionados com módulos de 665 Wp. Os três cenários de cada caso são definidos para áreas de 1,64 km², 8,19 km² e 16,39 km², os quais correspondem a 1%, 5% e 10% da área útil do corpo d'água, considerando o percentual destinado aos espaçamentos entre os módulos para movimentação dos técnicos. A potência instalada dos cenários varia entre 350,42 MWp e 3.641,78 MWp e a geração anual varia entre 675,33 GWh e 7.018,43 GWh. No capítulo de resultados e discussões, estes valores são comparados com os dados obtidos com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Associação Brasileiro de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a CHESF e o ONS e são feitas análises do impacto dos variados cenários no que concerne a diferentes aspectos do setor elétrico no Brasil, no Nordeste, no Ceará e no Piauí.

Palavras-chave: Solar Fotovoltaica; Fotovoltaica Flutuante; Geração de eletricidade; Usina Hidroelétrica.

ABSTRACT

The growth in demand for clean and renewable energy is notorious in several around the world, in view of global projects to reduce carbon emissions and better use of the Earth's natural resources. In this sense, international projections indicate that photovoltaic (PV) systems will reach the highest installed power among the types of electricity generation in the world by 2050. To corroborate with this scenario, Floating Photovoltaic (FPV) systems have been presented as a great alternative for several countries, in view of the diverse benefits, such as increased generation efficiency and reduced evaporation from the body of water where this it is installed. In Brazil, studies already demonstrate the generation potential of this type of PV system. In the Northeast, for example, there are many water bodies that provide the location of PV modules on floats. As a way of contributing to society, this work of course conclusion has the objective of identify the PV generation potential for a FPV plant installed on Boa Esperança hydropower dam, in which the useful estimate area is 248.30 km². In this context, through data from the UHE in question, which are available on the websites of the Operador Nacional do Sistema (ONS) and the Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), comparisons are made with the results obtained for the FPV plants. Therefore, six scenarios are proposed, in which the first three refer to installations with 480 Wp photovoltaic modules and the others are related to 665 Wp modules. The three scenarios for each case are defined for areas of 1.64 km², 8.19 km² and 16.39 km², which correspond to 1%, 5% and 10% of the useful area of the water body, considering the percentage intended for spacing between modules for moving technicians. The installed capacity of the scenarios varies between 350.42 MWp and 3,641.78 MWp and the annual generation varies between 675.33 GWh and 7,018.43 GWh. In the chapter of results and discussions, these values are compared with data obtained from Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), CHESF and ONS, and analyzes are made of the impact of different scenarios about distinct aspects of the electricity sector in Brazil, in the Northeast, in Ceará and Piauí.

Keywords: Solar-photovoltaic; Floating Photovoltaic; Electricity generation; Hydropower plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de um sistema FVF.....	23
Figura 2 – Localização da UHE Boa Esperança.....	31
Figura 3 – Dados do reservatório de Boa Esperança.....	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança – 2012.	32
Gráfico 2 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança – 2013.	33
Gráfico 3 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança – 2014.	34
Gráfico 4 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2015.	35
Gráfico 5 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2016.	36
Gráfico 6 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2017.	37
Gráfico 7 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2018.	38
Gráfico 8 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2019.	39
Gráfico 9 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2020.	39
Gráfico 10 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2021.	40
Gráfico 11 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2022.	41
Gráfico 12 – Geração anual da UHE Boa Esperança (2012 – 2022).	42
Gráfico 13 – Média histórica anual de produção da UHE Boa Esperança.	44
Gráfico 14 – Comportamento mensal dos valores de geração da UHE Boa Esperança (2012-2022).	46
Gráfico 15 – Comportamento médio mensal dos valores de geração da UHE Boa Esperança.	47
Gráfico 16 – Curva da evolução histórica da Cota.	49
Gráfico 17 – Curva da evolução histórica do volume útil.	50
Gráfico 18 – Histograma da Cota.	51
Gráfico 19 – Curvas Cota x Área x Volume da UHE Boa Esperança.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos artigos apresentados.	28
Tabela 2 – Resumo dos resultados para a usina FVF com módulos de 480 Wp.....	59
Tabela 3 – Resumo dos resultados para a usina FVF com módulos de 665Wp.....	59
Tabela 4 – Comparação das capacidades instaladas da FVF e da UHE de Boa Esperança.	60
Tabela 5 – Comparação das gerações anuais da FVF e da UHE de Boa Esperança.	60
Tabela 6 – Comparação das gerações anuais da usina FVF e do Brasil.....	62
Tabela 7 – Comparação das capacidades instaladas da FVF e de sistemas FVF do Brasil.....	63
Tabela 8 – Comparação das gerações anuais da usina FVF e de sistemas FV do Brasil.	64
Tabela 9 – Comparação das gerações anuais da usina FVF e do estado do Piauí.....	65
Tabela 10 – Comparação da geração anual da usina FVF e do consumo do Piauí.	65
Tabela 11 – Comparação entre gerações anuais da usina FVF e consumo em diferentes classes de UCs no Piauí.	66
Tabela 12 – Comparação das gerações anuais da usina FVF e do Ceará.....	68
Tabela 13 – Comparação da geração anual da usina FVF e do consumo do Ceará.	68
Tabela 14 – Comparação entre gerações anuais da usina FVF e consumo em diferentes classes de UCs no Ceará.	69
Tabela 15 – Comparação da geração anual da usina FVF e do consumo de setores comerciais e industriais do Nordeste.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
A_{fvf}	Área útil de instalação do sistema fotovoltaico
A_{mod}	Área do módulo
A_{mod1}	Área do módulo 1
A_{mod2}	Área do módulo 2
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BA	Bahia
BEN	Balanco Energético Nacional
CAV	Cota (m) x Área (km ²) x Volume (hm ³)
CE	Ceará
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CNAE	Classificação Nacional de Atividade Econômica
COHEBE	Companhia Hidrelétrica de Boa Esperança
EAR	Energia Armazenada
ENA	Energia Natural Afluyente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FC	Fator de Capacidade
FV	Fotovoltaico
FVF	Fotovoltaico Flutuante
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i>
MA	Maranhão
MME	Ministério de Minas e Energia
ONG	Organização Não-Governamental
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PI	Piauí
PID	<i>Potential Induced Degradation</i>
P_{inst}	Potência Instalada
PNE	Plano Nacional de Energia
REN	Resolução Normativa

RN	Rio Grande do Norte
SE	Subestação
SEINFRA	Secretaria da Infraestrutura
SIN	Sistema Interligado Nacional
UC	Unidade Consumidora
UF	Unidade Federativa
UHE	Usina Hidrelétrica
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

%	Porcentagem
W	Watt
Wp	Watt-pico
kW	Quilowatt
kWp	Quilowatt-pico
kWh	Quilowatt-hora
kWh/kWp	Quilowatt-hora por Quilowatt-pico.
MLT	Vazão Média de Longo Termo
MW	Megawatt
MWmed	Megawatt médio
MWp	Megawatt-pico
MWh	Megawatt-hora
GW	Gigawatt
GWp	Gigawatt-pico
GWh	Gigawatt-hora
GWh/mês	Gigawatt-hora por mês
GWh/ano	Gigawatt-hora por ano
TW	Terawatt
TWh	Terawatt-hora
TWh/ano	Terawatt-hora por ano
m	Metro
m ²	Metro-quadrado
m ³	Metro-cúbico
mcm	Milhões de metros-cúbicos
km	Quilometro
km ²	Quilometro-quadrado
h	Hora
ha	Hectare
hm ³	Hectometro cúbico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação	19
1.2	Objetivos	19
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	19
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	20
1.3	Estrutura do Trabalho	20
2	ESTADO DA ARTE	21
2.1	Histórico	21
2.2	Detalhes de Usinas FVF	22
2.3	Artigos relacionados	23
3	METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS FVF EM RESERVATÓRIOS DE UHE COM BASE NA ÁREA OCUPADA	30
3.1	Procedimentos para análise da UHE	30
3.1.1	<i>Caracterização da área de estudo</i>	30
3.1.2	<i>Descrição da base de dados utilizada</i>	31
3.1.3	<i>Análise do histórico anual de geração da UHE Boa Esperança</i>	32
3.1.3.1	<i>Análise da geração mensal da UHE Boa Esperança</i>	42
3.1.3.2	<i>Análise da variação da geração da UHE Boa Esperança</i>	46
3.1.4	<i>Definição da área por dados de Cota x Área x Volume</i>	48
3.2	Formulação matemática da capacidade instalada	53
4	DIMENSIONAMENTO DA USINA FVF	54
4.1	Apresentação e descrição das equações utilizadas	54
4.2	Cenários utilizando o módulo de 480 Wp	55
4.2.1	<i>Cenário 1.1</i>	55
4.2.2	<i>Cenário 1.2</i>	55
4.2.3	<i>Cenário 1.3</i>	56
4.3	Cenário utilizando o módulo de 665 Wp	57
4.3.1	<i>Cenário 2.1</i>	57
4.3.2	<i>Cenário 2.2</i>	57

4.3.3	<i>Cenário 2.3</i>	58
4.4	Resumo dos resultados obtidos	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1	Comparativo com os dados da UHE de Boa Esperança	60
5.2	Comparativo com os dados do Brasil	61
5.2.1	<i>Análise considerando o histórico de geração de eletricidade do País</i>	62
5.2.2	<i>Análise considerando o histórico da capacidade instalada FV do País</i>	62
5.2.3	<i>Análise considerando o histórico de geração total dos sistemas FV do País</i> ..	63
5.3	Comparativo com dados do Piauí	64
5.3.1	<i>Análise considerando o histórico de geração total do Estado</i>	64
5.3.2	<i>Análise considerando o histórico de consumo total do Estado</i>	65
5.3.3	<i>Análise considerando o consumo do Estado em diferentes classes de unidades consumidoras</i>	66
5.4	Comparativo com dados do Ceará	67
5.4.1	<i>Análise considerando o histórico de geração total do Estado</i>	67
5.4.2	<i>Análise considerando o histórico de consumo total do Estado</i>	68
5.4.3	<i>Análise considerando o consumo do Estado em diferentes classes de unidades consumidoras</i>	69
5.5	Comparativo com dados de consumo comercial e industrial do Nordeste ..	70
6	CONCLUSÕES	73
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	76
	ANEXO A – <i>DATASHEET</i> DO MÓDULO DE 480 Wp	82
	ANEXO B – <i>DATASHEET</i> DO MÓDULO DE 665 Wp	84

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as Usinas Hidrelétricas (UHE) possuem a maior capacidade instalada entre todos os tipos de fontes no Sistema Interligado Nacional (SIN), o que representa, em termos percentuais, 53% da matriz elétrica brasileira em 2023 [1]. Tal fato demonstra a grande dependência nacional de um regime de chuvas que seja capaz de manter os níveis hidrológicos adequados. No entanto, ao longo da história nacional, é notório que os níveis de armazenamento dos reservatórios de água, em muitos momentos, esteve abaixo do ideal.

Segundo o ONS, em agosto de 2021, o Brasil bateu recorde de geração elétrica por termelétricas (considerando o início da série histórica em 1999) [2]. Isto é resultado da pior crise hídrica nacional em anos e da maior oferta de usinas térmicas no País. A necessidade de uso deste tipo de usina vai na contramão do que está sendo incentivado no mundo, onde há debates que favorecem o crescimento do uso de fontes renováveis e a descarbonização da atmosfera.

O fato de o Plano Nacional de Energia (PNE) 2050 considerar para as simulações custos com repotenciação de hidrelétricas [3], a pressão de organizações não governamentais (ONGs) ligadas ao meio ambiente e um grande investimento em outras fontes de geração são fatores que ilustram a pouca margem de construção de novas UHEs no Brasil. Para 2027, o ONS prevê um aumento de capacidade instalada para este tipo de instalação de apenas 738 MW, representando uma queda na influência destas usinas para o patamar de 47,98% da Matriz Elétrica do mesmo ano [1].

Neste contexto, a notável expansão dos sistemas fotovoltaicos (FV) (nas suas mais diversas formas de instalação) tem ganhado força no cenário nacional. O ONS indica que este tipo de instalação representará 7,58% da matriz de energia elétrica do SIN em 2027, sem considerar os dados de micro e minigeração distribuída, o que representa um crescimento em relação aos 4,94% apresentados em junho de 2023 [1].

A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) traz alguns números deste crescimento nacional. Segundo esta instituição, o Brasil alcançou, em 2022, 25.373 MW de potência instalada, considerando Geração Centralizada (GC) e Geração Distribuída (GD) FV. Além disso, dados mais recentes da ABSOLAR, de maio de 2023, registram 30.615 MW de potência instalada no País para esta fonte de geração [4]. Vale ressaltar que estes números estão dentro do cenário mundial que, segundo relatório da *SolarPower Europe*, atingiu, no começo de maio de 2022, 1TW de capacidade instalada para a fonte de

produção em questão e, ao mesmo tempo, projeta que o mundo alcançará o dobro deste valor em 2025 [5].

Ademais, o contexto dos números supracitados englobam os mais diversos tipos de tecnologia FV desenvolvidas pelas mais diferentes empresas, centros de pesquisa e universidade, nos quais está presente as usinas fotovoltaicas flutuantes (FVF). De acordo com [6], o mercado global de energia solar FVF pode dobrar até 2031, ultrapassando 6 GW de potência instalada. Além disso, segundo [7], em janeiro de 2022, a China colocou em operação a maior usina FVF do mundo, com capacidade instalada de 320 MW, exemplificando os diversos investimentos feitos para estes tipos de construção.

1.1 Motivação

Os projetos de usinas FVF são alternativas que possibilitam o aproveitamento do espaço destes reservatórios, além de auxiliar na efficientização dos sistemas FV. No Brasil, há uma expectativa da tecnologia, em 2024, atingir a marca de 200 MW de geração, na modalidade de GD [8]. O estudo do Grupo Banco Mundial apresenta uma estimativa do potencial da capacidade instalada da FVF (em GWp) em reservatórios para cada continente. Com relação à América do Sul, foram avaliados 299 corpos d'águas, resultando em potencial de plantas FVF de 36 GWp, 181 GWp ou 361 GWp, para 1%, 5% ou 10% de área superficial utilizada, respectivamente [9].

Neste âmbito, o presente trabalho busca auxiliar nos diversos estudos que estão sendo feitos para que este tipo de sistema FV seja desenvolvido, pois quanto mais construções forem feitas a tendência é que os custos reduzam e a viabilidade dos projetos aumentem.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são divididos em gerais e específicos, conforme indicado nas seções 1.2.1 e 1.2.2.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho consiste em levantar e analisar dados do SIN, do ONS, da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) e da Empresa de Pesquisa Energética

(EPE), auxiliando na proposição de dois casos, cada um com três cenários, de implementação de plantas FVF no reservatório da UHE de Boa Esperança.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos desse trabalho:

- a) Levantamento e análise de dados de geração da UHE de Boa Esperança.
- b) Dimensionamento das usinas FVF.
- c) Análise do impacto dos variados cenários no que concerne a diferentes aspectos do setor elétrico no Brasil, no Nordeste, no Ceará e no Piauí.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos visando orientar a compreensão de todo o estudo, os quais estão listados abaixo:

No capítulo 2 é caracterizado o panorama brasileiro e nacional sobre o tema, mediante a apresentação de diversos artigos.

No capítulo 3 são apresentados os dados levantados no que concerne à UHE de Boa Esperança, bem como a metodologia utilizada para a construção dos cenários.

No capítulo 4 é apresentado o dimensionamento dos seis cenários.

No capítulo 5 é feita a análise do potencial de geração das usinas FVF propostas mediante a comparação com dados a níveis nacional, regional e estadual.

No capítulo 6 constam as conclusões do estudo realizado.

2 ESTADO DA ARTE

O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente aos trabalhos já desenvolvidos a respeito de sistemas FVF. Na seção 2.1 são expostos alguns dados históricos a respeito da necessidade do mundo de energia limpa e da legislação que rege esse âmbito no Brasil. Na seção 2.2, por sua vez, são mostrados detalhes a respeito da instalação de usinas FVF, a qual possui algumas vantagens e alguns desafios específicos. Ademais, na seção 2.3 são apresentados trabalhos relacionados a este tipo de tecnologia, tais como: artigos, metodologias de dimensionamento e experiências com implementação de pequenos e grandes sistemas.

2.1 Histórico

O notável crescimento de demanda energética mundial, o forte clamor de muitos integrantes relevantes da sociedade para a redução da emissão de carbono, o crescimento no investimento em usinas de Hidrogênio Verde, dentre outros fatores, ilustram o porquê de as projeções internacionais indicarem que os sistemas FV caracterizarão a maior potência instalada entre os tipos de geração elétrica do Mundo até 2050 [10].

O desenvolvimento da Energia Solar no Brasil se deu de forma mais intensa a partir da Resolução Normativa (REN) nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [11], a qual deu as bases para a criação da Lei 14.300, de 6 de janeiro de 2022, que institui o marco legal de microgeração e minigeração distribuída [12]. A REN supracitada estabeleceu os critérios necessários para a conexão de sistemas de micro e minigeração à rede, além de instituir medidas que incentivavam o uso deste tipo de energia. Como modernização, surgiram as RENs nº 687/2015 [13] e nº 786/2017 [14], dentre outras, as quais já foram substituídas pela REN nº 1059/2023 [15] que define, em seu artigo 2º, nos incisos XXIX-A e XXIX-B, as regras para conexão e faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída, conforme exposto:

Art. 2º

XXIX-A - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme a Resolução Normativa nº 1.031, de 26 de julho de 2022, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidade consumidora;

XXIX-B - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada, conforme a Resolução Normativa nº 1.031, de 26 de julho de 2022, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de

instalações de unidade consumidora, que possua potência instalada em corrente alternada maior que 75 kW e menor ou igual a:

a) 5 MW para as centrais geradoras de fontes despacháveis;

b) 3 MW para as demais fontes não enquadradas como centrais geradoras de fontes despacháveis; ou

c) 5 MW para unidades consumidoras já conectadas em 7 de janeiro de 2022 ou que protocolarem solicitação de orçamento de conexão, nos termos da Seção IX do Capítulo II do Título I, até 7 de janeiro de 2023, independentemente do enquadramento como centrais geradoras de fontes despacháveis.

2.2 Detalhes de Usinas FVF

Os sistemas FVF, por sua vez, possuem inúmeras vantagens em relação às usinas convencionais, como a presença de menos obstáculos para bloqueio da luz solar, a melhor eficiência energética, a reduzida temperatura dos painéis, o reduzido efeito da sujeira e a salvaguarda de terras [16].

Dentre os desafios para a instalação deste tipo de sistema estão o fato de as usinas estarem sujeitas à instabilidade de posição e aos ventos da natureza, além da presença constante de humidade, a qual pode causar rápida deterioração da potência dos módulos. Desta forma, é necessário ainda aprofundar os impactos destes fatores e a possibilidade de penetração de água nestes elementos do sistema, pois ainda não há o desenvolvimento em grande quantidade de módulos projetados para esse contexto específico [17].

Além disso, [16] alerta para alguns fatores ambientais que podem ser causados por plantas FVF, tais como: a possibilidade de repercussões em áreas ecologicamente protegidas e vulneráveis; a possível redução da população de algas, devido à redução de luz solar e da fotossíntese; o potencial prejuízo à qualidade da água, devido ao silício presente nos módulos e ao polietileno de alta densidade presente nos flutuadores; os eventuais acidentes elétricos envolvendo cabos subaquáticos. No entanto, assim como os problemas apresentados no parágrafo anterior, todos estas são situações a serem estudadas mais profundamente.

Com relação aos componentes deste tipo de sistema, estão:

Os módulos FV, os quais são iguais aos utilizados nas usinas terrestres (monocristalinas e policristalinas), apesar de necessitarem de vedação eficiente para evitar corrosão devido à água. Neste contexto, em [17] é explicado que há o risco de degradação de potência do módulo devido à umidade do ambiente, efeito conhecido como *Potential Induced Degradation* (PID). Assim, [17], utilizando outro trabalho, apresenta a sugestão de se utilizar módulos com vidro na parte traseira, pois, em teoria, a taxa de transmissão do vapor d'água deste material é nulo, apesar de, na prática, não evitar totalmente a transferência de umidade.

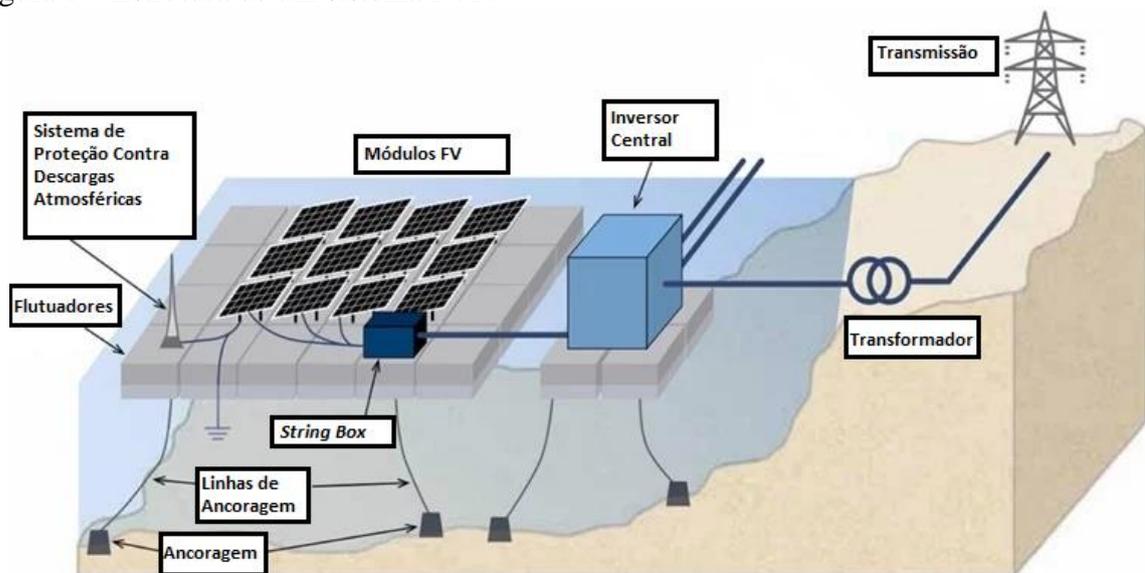
Além disso, sugere que usem dissecantes no interior do módulo, o que faria com que o ingresso da umidade fosse menor.

Os flutuadores de *high density polyethylene* (HDPE), que devem estar bem fixos através de um sistema de ancoragem, tendo a capacidade de resistir às variações de nível do reservatório, aos fortes ventos e à presença de peixes e algas [16].

Os conectores e cabos servem para levar a eletricidade gerada pelos módulos para os inversores e à subestação. Deste modo, a utilização de condutores adequados e caixas de junção à prova d'água IP67 são importantes nestes sistemas, além de cabos robustos à prova d'água e resistentes às altas temperaturas, assim o serviço se torna mais duradouro [16].

Na Figura 1, pode-se identificar um esquema que resume bem os elementos a serem utilizados na construção e instalação de uma usina FVF.

Figura 1 – Estrutura de um sistema FVF.



Fonte: Adaptado [9].

2.3 Artigos relacionados

Vários artigos relacionados a esta temática têm sido desenvolvidos nos últimos anos, os quais são de grande utilidade para o bom andamento da presente monografia. Os artigos apresentados abaixo estão organizados da seguinte maneira: primeiro são expostos estudos que fazem análises gerais a respeito das vantagens e desafios deste tipo de sistema, depois há a apresentação de artigos relacionados a experimentos internacionais e, por fim, trabalhos relacionados com o Brasil.

[18] definem como sistemas híbridos aqueles em que se obtêm algum tipo de vantagem econômica com a associação de múltiplas tecnologias de geração, em relação ao custo e/ou valor associado destas operando de forma independente. Além disso, propõem três configurações possíveis para a hibridização. Nos sistemas híbridos de “co-localização” duas ou mais tecnologias são alocadas em um mesmo espaço apenas para economizarem com custos de operação, mas sua operação ocorre de maneira distinta. Os “sistemas híbridos virtuais” ocorrem quando duas ou mais tecnologias são implantadas em locais diferentes, mas com suas operações ligadas através de acordos bilaterais e algum tipo de operação co-otimizada, trazendo melhorias na performance destas gerações. Por fim, há os sistemas totalmente híbridos, nos quais há melhorias na performance e redução de custos de operação, ao mesmo tempo. Estes consistem na associação entre ao menos uma fonte despachável somada a uma ou mais fontes renováveis de geração, em que, somadas, apresentam benefícios.

Em posse das informações supracitadas, [19] apresentam alguns benefícios da hibridização entre hidrelétricas e usinas FVF, tais como: a possibilidade de se utilizar o excedente de geração solar para o bombeamento de água para reservatórios superiores, a qual poderá ser utilizada para geração da UHE; a conservação de água durante os horários de pico do sol; a redução de custos com o desenvolvimento de novos sistemas de transmissão, bem como a melhora das taxas de utilização das linhas etc. Ademais, são apresentados os dados de que este tipo de geração tem a capacidade de produzir, globalmente, de 4,251 TWh/ano a 10,616 TWh/ano, corroborando com a ideia de que é importante que existam mais estudos e trabalhos utilizando este conceito.

[20] fazem uma análise da associação entre hidroelétrica e usinas FVF em um formato de “bateria virtual”, no qual a água servirá como a “carga” acumulada nos momentos em que há irradiação solar e fornecimento de energia à rede por parte do sistema solar, enquanto a UHE só será usada mais intensamente em períodos de baixa ou nenhuma irradiação solar. Corroborando com a afirmação acima, os autores apresentam um dado de que o preenchimento de 25% da área disponível dos reservatórios deste tipo de empreendimento, ao redor do mundo, é capaz de gerar 6.270 TWh/ano, além de impedir a evaporação de 6,3% da água do local, o que representa mais possibilidade de geração de eletricidade. Dentre as limitações apresentadas estão a restrição da instalação destes sistemas para locais geográficos muito específicos e fortemente afetados por padrões climáticos, além de existir o fator de que a “bateria virtual” ser limitada de acordo com a capacidade do reservatório.

Com relação ao desafio dos fitoplanctons, [21] fazem uma análise do impacto destas populações para os sistemas FVF. É possível verificar que, ao utilizar simulações em diferentes

cenários, que usinas FVF possibilitam o resfriamento do corpo d'água, somando-se à redução da luminosidade deste e a conseqüente redução do crescimento das populações desta espécie. No entanto, os resultados mostram, também, que a localização da usina pode mudar significativamente a dinâmica térmica da água, modificando as respostas dos fitoplanctons. É possível concluir que a modelagem pré-instalação pode auxiliar os responsáveis a minimizar os impactos negativos e maximizar os benefícios deste tipo de sistema.

[22], por sua vez, fazem um estudo do impacto de usinas FVF no ciclo de vida das algas, trazendo conseqüências positivas para o balanço geral do oxigênio na água e evitando o crescimento de espécies que produzem toxinas. Além disso, é analisado o rendimento da hidroelétrica considerando que a água do reservatório esteja em uma altura mínima em que o FVF não encalhe. Como resultado, observa-se que a usina FVF ideal deve cobrir entre 40% e 60% da área da superfície do lago, pois nestes valores a concentração de algas permanece em valores recomendados sem causar perdas de rendimento.

[23] analisam as vantagens apresentadas no pareamento entre usinas FVF e hidroelétricas em 337 reservatórios na União Europeia (1/3 do total destes espaços no bloco), considerando quatro cenários com dois tipos de flutuadores diferentes. É observado que a perda de água nestes corpos d'água é da ordem de 9380 mcm. Diante disso, a instalação de FVF com capacidade instalada iguais às das plantas de geração hídrica têm um potencial de gerar 42,31 TWh, cobrindo apenas 2,3% da área total disponibilizada e impedindo a evaporação de 557 mcm de água. Ademais, os benefícios advindos desta associação são compatíveis às metas da União Europeia de emissão zero de carbono para os próximos anos, apresentando-se então com uma alternativa para o suprimento das demandas energéticas e ambientais crescentes.

[24] proveem uma análise a respeito do potencial de instalação de sistemas FVF no continente africano, utilizando os dados de 146 reservatórios de hidrelétricas ao longo do continente, em quatro condições diferentes de níveis de preenchimento e com a possibilidade de utilização de dois flutuadores distintos. Neste sentido, os resultados demonstram que com o uso de uma cobertura dos corpos d'água de menos de 1% a produção energética anual poderá ter um ganho de 46,04 TWh, além de possibilitar a não evaporação de 743 milhões m³/ano de água, incrementando a produção hidroelétrica anual em 170,64 TWh.

[25] fazem uma análise do potencial de uma planta FVF no reservatório da hidrelétrica de Ghazi Barotha, no Paquistão. Dentre as vantagens da implementação deste tipo de sistema estão, respectivamente, a complementariedade de geração com a fonte hidráulica, trazendo a possibilidade de atender os picos de demanda, e o aproveitamento da infraestrutura de transmissão e distribuição já existentes para o despacho da energia gerada. Neste contexto,

é feita a análise para um sistema de 200 MW, o qual traz impactos positivos na infraestrutura elétrica e no crescimento econômico, além de contribuir com a meta da produção de energia ser 100% proveniente de fontes renováveis em 2050, no País.

[26] fazem uma análise do potencial de instalação de uma usina FVF na represa da hidrelétrica de Demirköprü em Manisa, Turquia. Para tanto, foi feito o monitoramento por mais de 20 anos do local por meio de imagens de satélites. Com isso, encontra-se que a área mínima da superfície d'água, neste período, foi de 1.562,45 ha, a qual seria suficiente para a instalação de um sistema FVF com capacidade de 2,03 GWp, que produziria 3.328,33 GWh/ano. Por fim, para corroborar ainda mais com a atratividade do projeto, verifica-se que em 2019 a usina não foi utilizada em 7 meses do ano, o que não aconteceria se a produção FVF estivesse associada. Além disso, a usina impediria 28.596.875 m³ de água de serem evaporados, o que representa a possibilidade de uma geração de 6,57 GWh/ano a mais, por parte da geração através da fonte hídrica.

[27] analisam as vantagens apresentadas para sistemas FVF no caso brasileiro, concluindo que são necessários mais estudos para a comprovação dos benefícios esperados. Apesar disso, foram expostas algumas conclusões: o aumento da eficiência poderá ser significativo na região Nordeste, mas pouco significativo no Norte; a estrutura flutuante e seu respectivo sistema de ancoragem devem prever amplas variações no nível da água, inclusive a possibilidade de ter de permanecer apoiado no fundo de um reservatório seco; a resistência dos flutuadores de suporte dos sistemas FV às condições de radiação solar e temperatura em regiões tropicais, bem como à água com material em suspensão e detritos flutuantes deve ser assegurada no Brasil.

[28] realizam o primeiro estudo a respeito do potencial técnico de sistemas FVF em corpos d'água artificiais no Brasil em nível nacional e estadual. Neste âmbito, as áreas de proteção não foram consideradas no estudo, utilizando o *software* QGIS para localizar os pontos desejados. Como resultado, verifica-se que, com a cobertura de apenas 1% da área escolhida, este tipo de produção pode gerar o equivalente a , aproximadamente, 12,5% da energia já verificada anualmente, o que corresponde por volta de 16% do consumo energético nacional.

[29] fazem uma pesquisa a respeito do impacto da geração de plantas FV flutuantes sobre a matriz energética de estados do semiárido brasileiro. Neste contexto, é considerado que as plantas FVF podem aproveitar a extensa rede de reservatórios já instaladas na região e os altos índices de irradiação solar. O potencial de geração investigou dois cenários: um com módulos FV de 265 Wp e outro com módulos FV de 380 Wp. Neste sentido, através do uso de curva de permanência (CP), com confiabilidade considerada de 80%, são determinadas as

capacidades das usinas FVF de modo a comparar as gerações destas com o consumo anual de energia elétrica dos estados analisados, em 2020. Como resultado, é constatado que estas usinas, além de propiciarem uma alternativa de geração limpa e sustentável, podem suprir total ou parcialmente a demanda elétrica de seus respectivos estados. Para fins de exemplificação, o Ceará (CE) tem uma perspectiva de geração de 18,15 TWh para o cenário 1 e 20,99 TWh no cenário 2; para o Rio Grande do Norte (RN) a geração é de 16,89 TWh e 19,54 TWh para os cenários 1 e 2, respectivamente; a Bahia (BA) tem uma expectativa de produção de 9,76 TWh para o primeiro cenário e 11,29 TWh para o segundo. O reservatório Eng. Armando Ribeiro Gonçalves apresentou os maiores valores percentuais: 227% e 263% do consumo do RN para os casos 1 e 2, respectivamente.

[30] fazem uma análise do potencial energético de usinas FVF na bacia do Tocantins-Araguaia, utilizando dados da superfície aquática de 30 reservatórios de hidroelétricas da região, além de realizar uma breve observação a respeito da redução de gás carbônico devido à instalação deste tipo de tecnologia. Devido à região Centro-Oeste do Brasil possuir alta incidência solar, perdendo apenas para o Nordeste, os principais dados mostram que a geração das usinas solares pode variar entre 25,55 TWh/ano (para ocupação de 1% da área alagada) e 2555,04 TWh/ano (para ocupação de 100%). Além disso, ao se considerar os ganhos com a redução da evaporação o potencial de geração hidrelétrica aumenta e pode alcançar entre 16,17 GWh/ano e 892,95 GWh/ano. Por fim, as reduções nas emissões de gases CO₂ são estimadas entre 19,86 e 2024,30 milhões tCO₂/ano.

[31] realizam um dimensionamento técnico de um sistema FVF, baseado na ociosidade de despacho de potência com relação à capacidade reservada para escoamento na rede da Subestação UHE Sobradinho para analisar a viabilidade financeira do empreendimento solar. Conclui-se que, em condições favoráveis, este tipo de usina pode ser altamente competitiva e não compromete as outras atividades que dependem das águas, tais como pesca, irrigação e geração hídrica, visto a baixa taxa de ocupação dos painéis FV. Além disso, observa-se que o fato de já existir uma UHE proporciona uma maior competitividade nos preços de energia das usinas flutuantes, pois compartilham da infraestrutura e custos operacionais de outra usina já existente no local. Isso corrobora com o fato da necessidade de se analisar mais profundamente a associação entre estes dois tipos de geração.

[32] analisam a possibilidade da instalação de FVFs como alternativa para a baixa produção nas barragens da Amazônia. Dentre as conclusões desta análise foi observado que a instalação destas plantas melhora em 55,5% a probabilidade de perda de carga, a qual impede de o sistema operar de acordo com a demanda adequada, do atual sistema, e em 46,2% para os

sistemas projetados para 2023. Além disso, observa-se que este tipo de associação é uma alternativa para a redução do impacto social e ambiental da construção de novas barragens, além de ir ao encontro às necessidades energéticas do País.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos artigos analisados anteriormente, dando enfoque em seus respectivos temas.

Tabela 1 – Resumo dos artigos apresentados.

Autores	Ano	Local	Tema	Referência
Sahu <i>et al.</i>	2016	Índia	Usinas FVF: Uma Revisão	[16]
Borba e Novak	2018	Brasil	Sistemas FVF: Aspectos Positivos e Desafios	[17]
Murphy <i>et al.</i>	2020	Estados Unidos	Uma taxonomia de sistemas que combina energia renovável em escala de utilidade e armazenamento de energia	[18]
Lee <i>et al.</i>	2020	Global	Sistemas de geração híbridos hídrico-FVF: Benefícios e avaliação global do potencial técnico	[19]
Farfan e Breyer	2018	Global	Combinando plantas FVF e reservatórios de UHE: Uma Bateria Virtual de Grande Potencial Global	[20]
Exley <i>et al.</i>	2022	Reino Unido	Impacto de painéis FVF na população de fitoplanctons: Um modelo experimental	[21]
Haas <i>et al.</i>	2020	Chile	Plantas FVF: Impactos ecológicos VS flexibilidade de operação hidrelétrica.	[22]
Kakoulaki <i>et al.</i>	2022	Europa	Benefícios do pareamento entre sistemas FVF e reservatórios de hidrelétricas na Europa	[23]
Sanchez <i>et al.</i>	2021	África	Avaliação do potencial FVF em reservatórios de hidroelétricas já existentes na África	[24]
Rauf <i>et al.</i>	2019	Paquistão	Integração de um FVF com uma planta hidroelétrica: Análise do reservatório Ghazi Barotha no Paquistão	[25]
Ates <i>et al.</i>	2020	Turquia	Utilização de sensores remotos para calcular o potencial técnico de uma planta FVF na superfície de uma represa.	[26]
Galdino e Olivieri	2016	Brasil	Considerações sobre a implantação de sistemas FVF no Brasil	[27]
Lopes <i>et al.</i>	2022	Brasil	Potencial técnico de FVF em corpos d'água artificiais no Brasil	[28]

Fonte: Próprio autor.

Tabela 1 – Resumo dos artigos apresentados (continuação).

Autores	Ano	Local	Tema	Referência
Moraes <i>et al.</i>	2022	Brasil	Plantas FVF como uma opção de suprimento elétrico na bacia do Tocantins-Araguaia	[29]
Lima <i>et al.</i>	2023	Brasil	Impacto da geração de FVF sobre a matriz energética de Estados do semiárido brasileiro	[30]
Medeiros e Ferreira	2018	Brasil	Utilização de um sistema FVF para operação coordenada com usina hidrelétrica e sua viabilidade financeira: Estudo de caso da UHE Sobradinho	[31]
Sulaeman <i>et al.</i>	2019	Brasil	O sistema FVF como um caminho alternativo para a subprodução nas represas da Amazônia	[32]

Fonte: Próprio autor.

3 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS FVF EM RESERVATÓRIOS DE UHE COM BASE NA ÁREA OCUPADA

No presente capítulo é apresentada a proposta de metodologia de dimensionamento de plantas FVF em reservatórios de UHE, tomando como base a superfície do corpo d'água disponível e seu histórico de regime hidrológico. Para o dimensionamento de plantas FVF nas condições apresentadas é necessária a observação de alguns aspectos técnicos que serão abordados neste trabalho, os quais são: área ocupada, potência dos módulos FV e hidrologia. Outros aspectos importantes, como a estrutura de flutuação, o sistema de ancoragem, a análise da proximidade com a rede elétrica, a orientação e a inclinação são sugestões de estudos futuros.

3.1 Procedimentos para análise da UHE

A metodologia proposta de dimensionamento é subdividida da seguinte forma:

- a) Obtenção e análise de dados históricos de geração;
- b) Obtenção e análise das áreas disponíveis;
- c) Cálculo da capacidade instalada do sistema FVF, produção diária de eletricidade e comparação com a geração da UHE.

Com relação aos pontos “a” e “b”, estas análises são feitas, principalmente, com os dados disponíveis nos sites do ONS, do Ministério de Minas e Energia (MME) e da Agência Nacional de Águas (ANA), os quais fornecem subsídios para apresentação dos números observados, que foram tratados para facilitação do estudo.

O ponto “c”, por sua vez, diz respeito a análises mais matemáticas que serão desenvolvidas no capítulo seguinte, pois neste haverá apenas a estruturação dos conceitos e bases necessárias para o bom desenvolvimento do trabalho.

3.1.1 Caracterização da área de estudo

A UHE de Boa Esperança, inicialmente implantada pela Companhia Hidrelétrica de Boa Esperança (COHEBE) em 1968, encontra-se em operação pela CHESF e está localizada entre os municípios de Guadalupe - PI e São João dos Patos - MA. Na Figura 2 é apresentada a localização da UHE Boa Esperança.

Figura 2 – Localização da UHE Boa Esperança.



Fonte: Adaptado [33].

O reservatório da UHE Boa Esperança está localizado no Rio Parnaíba, que, em sua extensão, possui 1.716 km. Em área de drenagem a UHE Boa Esperança possui 87.500 km² e capacidade máxima de armazenamento de 5.085 hm³, sua estrutura de barragem é do tipo mista terra-enrocamento possuindo altura máxima de 53 m e comprimento de crista de 5.212 m. A geração possui turbinas do tipo Francis, sendo duas de 55 MW e duas de 63,65 MW, totalizando capacidade instalada de 237,3 MW [34].

3.1.2 Descrição da base de dados utilizada

O ONS, em [2], fornece, na parte de dados gerais, dados de geração em GWh ou MWmed (energia média no intervalo de tempo considerado, em que, para um ano, 1 MWmed/ano = 8.760 MWh/ano) para diversos empreendimentos que se utilizam das mais diferentes fontes combustíveis, como hidráulica, eólica, FV, nuclear, etc. Estes dados podem ser obtidos nas escalas anuais, mensais, semana operativa, diárias e horárias, dentro do período selecionado no *dashboard* fornecido. Com relação à forma de coletar estes dados, foi escolhido o modo tabela de referência cruzada, utilizando arquivos .csv e .xls. Os meios escolhidos foram os supracitados, pois tornam a análise mais assertiva na construção de tabelas, gráficos e imagens que auxiliam e possibilitam o desenvolvimento do relatório mais claro e orgânico.

3.1.3 Análise do histórico anual de geração da UHE Boa Esperança

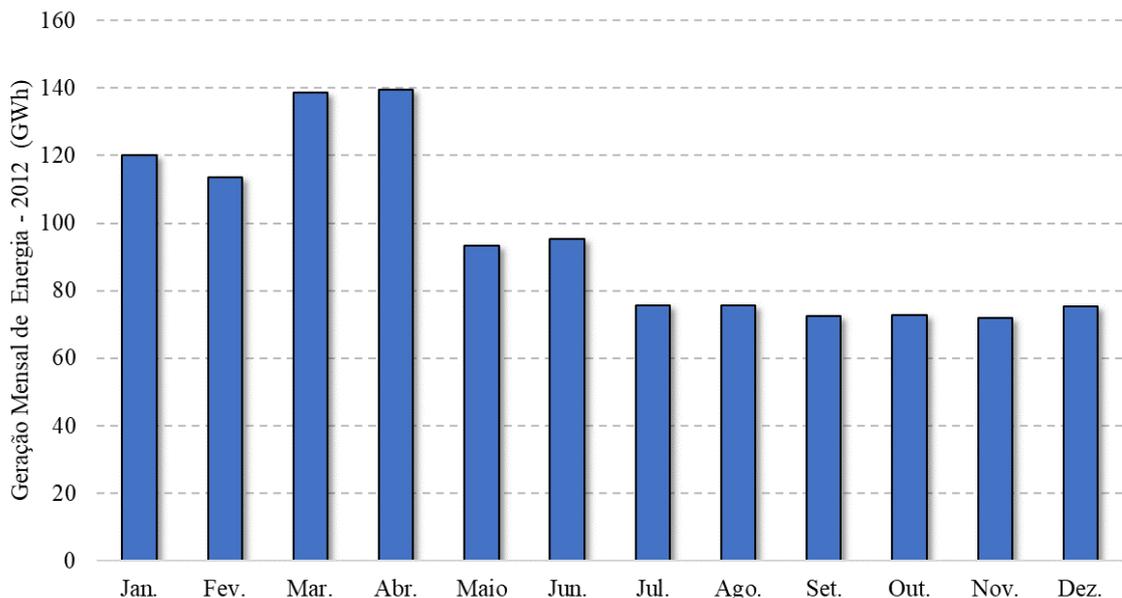
Para essa análise são utilizados os dados de geração da UHE Boa Esperança no período 2012-2022. Desse modo, há condições de se observar movimentos de transição entre o período chuvoso e seco, além de possíveis anomalias.

No Gráfico 1 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2012. Conforme constata-se, os primeiros meses do ano apresentam maior nível de geração, uma vez que coincidem com o período chuvoso no Nordeste.

Para o ano de 2012, a maior geração ocorreu em abril (139,46 GWh) e a menor em novembro (71,84 GWh). A média mensal de geração foi de 95,35 GWh. Os meses de janeiro (120,11 GWh), fevereiro (113,65 GWh), março (138,75 GWh), abril (139,46 GWh) e junho (95,39 GWh) alcançaram resultados superiores à média.

Um fato que merece destaque se refere ao comportamento atípico da geração nos meses de novembro e dezembro, uma vez que se assemelha aos meses anteriores (período de seca), embora se caracterizem como o início da quadra chuvosa no Nordeste. Esse comportamento é atribuído à ocorrência de condições hidrológicas desfavoráveis na região Nordeste desde fevereiro de 2012, provocando redução da Energia Natural Afluyente (ENA) para 42% da Vazão Média de Longo Termo (MLT), em outubro, pior índice registrado desde então na série de 82 anos de observação [35] e [36].

Gráfico 1 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança – 2012.



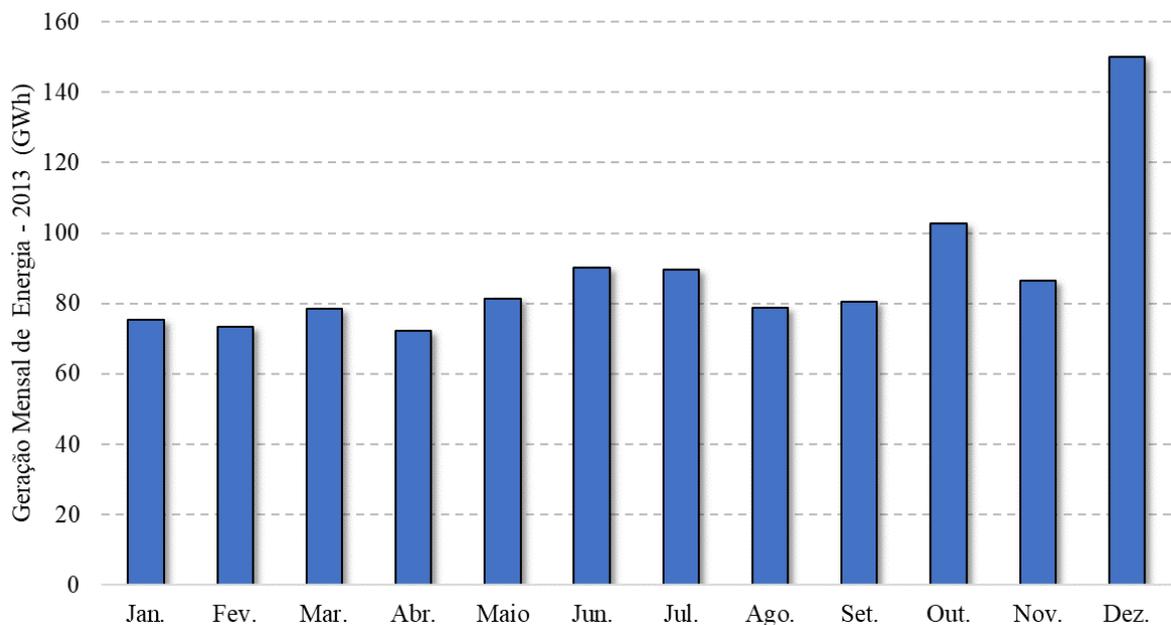
Fonte: [2].

No Gráfico 2 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2013. Diferentemente do que foi observado no Gráfico 1, os primeiros meses do ano (janeiro-abril) apresentam níveis de geração semelhantes ao período característicos de seca, ficando assim explicitado os efeitos das condições hidrológicas adversas observadas no fim de 2012.

Em 2013, a maior geração ocorreu em dezembro (149,97 GWh) e a menor em abril (72,25 GWh). A média mensal de geração foi de 88,25 GWh, em que apenas os meses de junho (90,27 GWh), julho (89,60 GWh), outubro (102,72 GWh) e dezembro (149,97 GWh) alcançaram resultados superiores à média. Em relação à 2012, a produção anual de 2013 foi cerca 7,45% menor.

Relatórios do MME apontam condições hidrológicas anormais negativas no subsistema Nordeste em 2013, sendo apontados escassez de chuvas nas Bacias do São Francisco e Paranaíba na 1ª quinzena de janeiro, falta de perspectivas de ocorrência do *El Niño* ou *La Niña* durante fevereiro e março em virtude das condições de temperatura do oceano Pacífico, permanências das condições desfavoráveis em junho e melhoria nas afluições brutas devido à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) na segunda quinzena de dezembro de 2013 [37].

Gráfico 2 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança – 2013.



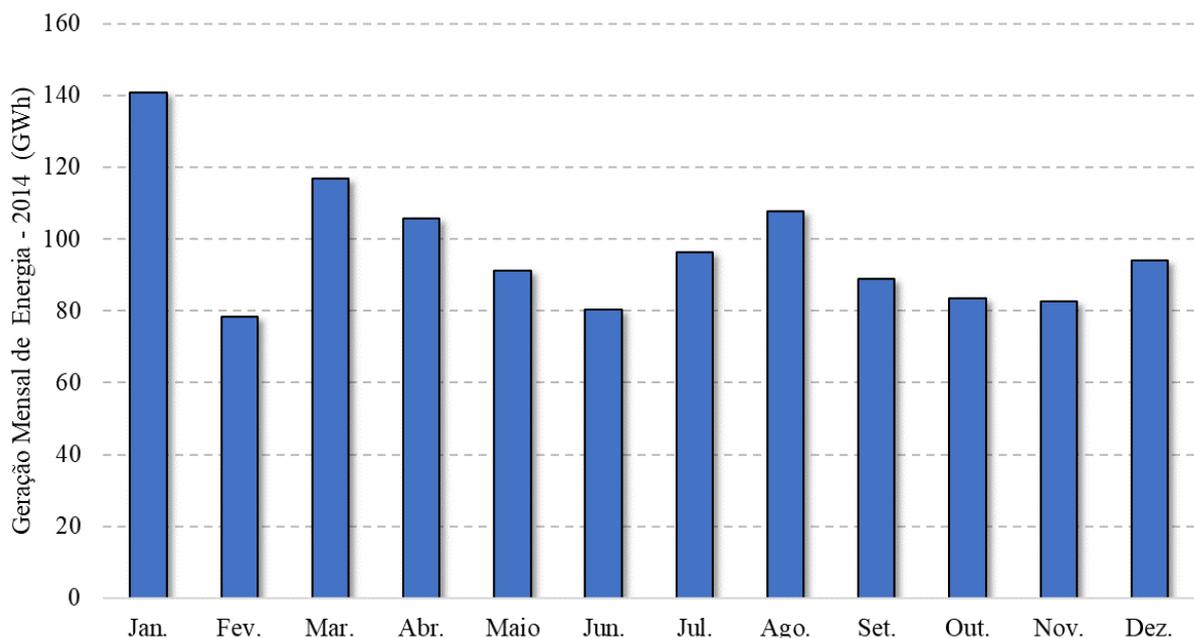
Fonte: [2].

No Gráfico 3 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2014. Devido à melhoria na afluência dos reservatórios do sistema Nordeste em dezembro de 2013, a geração de energia elétrica de janeiro de 2014 apresentou aumento de 86,70% em relação a geração de janeiro de 2013. Contudo, no mês de fevereiro, houve queda de 44,4% da produção em relação a janeiro, sendo observado melhoria no nível de produção em março e abril.

Em 2014, a maior geração ocorreu em janeiro (140,81 GWh) e a menor em fevereiro (78,75 GWh). A média mensal de geração foi de 97,22 GWh, sendo os meses de janeiro (140,81 GWh), março (116,82 GWh), abril (105,83 GWh) e agosto (107,61 GWh) os que alcançaram resultados superiores à média. Em relação à 2013, a produção anual de 2014 foi cerca 10,18% maior.

Dados do MME mostram que em janeiro a bacia do Paranaíba apresentou volume de chuva abaixo da climatologia típica para o período e que em fevereiro as condições hidrológicas foram afetada pela atuação de um sistema de alta pressão intenso e duradouro, como consequência, o subsistema Nordeste apresentou pior ENA bruta para o período em 82 anos. Além disso, em julho é relatado uma melhoria na climatologia, contudo, não sendo capaz de produzir efeitos significativos, uma vez que esse período se caracteriza tipicamente como não chuvoso e que em dezembro choveu cerca de 70% do esperando na bacia do Paranaíba [38].

Gráfico 3 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança – 2014.



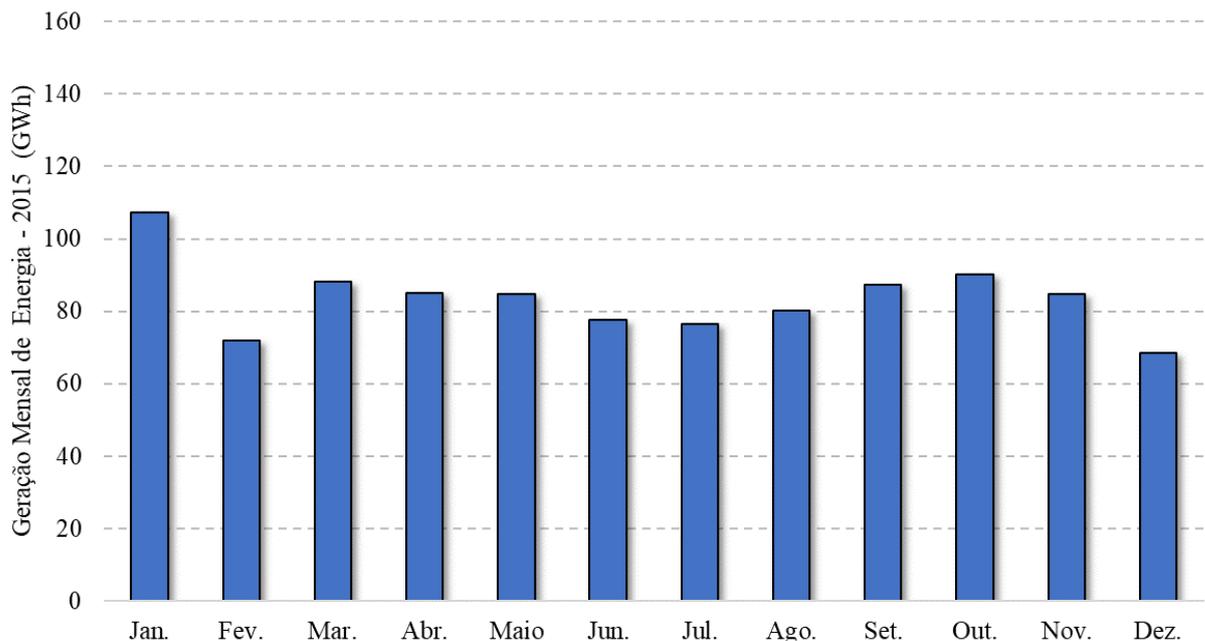
Fonte: [2].

No Gráfico 4 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2015. Observa-se que, com exceção do mês de janeiro, a geração se mostrou semelhante em todo o ano, sendo ressaltado que a geração do período chuvoso apresenta comportamento análogo ao não chuvoso, ou seja, um indicativo de condições hidrológicas desfavoráveis.

Em 2015, a maior geração ocorreu em janeiro (107,37 GWh) e a menor em dezembro (68,56 GWh). A média mensal de geração foi de 83,54 GWh, sendo que os meses de fevereiro (71,93 GWh), junho (77,59 GWh), julho (76,49 GWh), agosto (80,30 GWh) e dezembro (68,56 GWh) apresentaram geração menor que a média. Em relação à 2014, a produção anual de 2015 foi cerca 14,06% menor.

Segundo o MME, durante 2015, o subsistema Nordeste apresentou os piores valores de afluência da série histórica, nos respectivos períodos, para os meses de janeiro, fevereiro, março, agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro. Além disso, são destacadas anomalias positivas na climatologia de precipitações na bacia do Paranaíba em março e abril, o que justifica crescimento de 22,62% e 18,25%, respectivamente, em relação a geração de fevereiro. Destaca-se que a geração de janeiro foi menor 23,75% em relação a janeiro de 2014, sendo justificado pela ocorrência de apenas 30% do volume de chuvas esperados para a bacia do Paranaíba em janeiro de 2015 [39].

Gráfico 4 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2015.

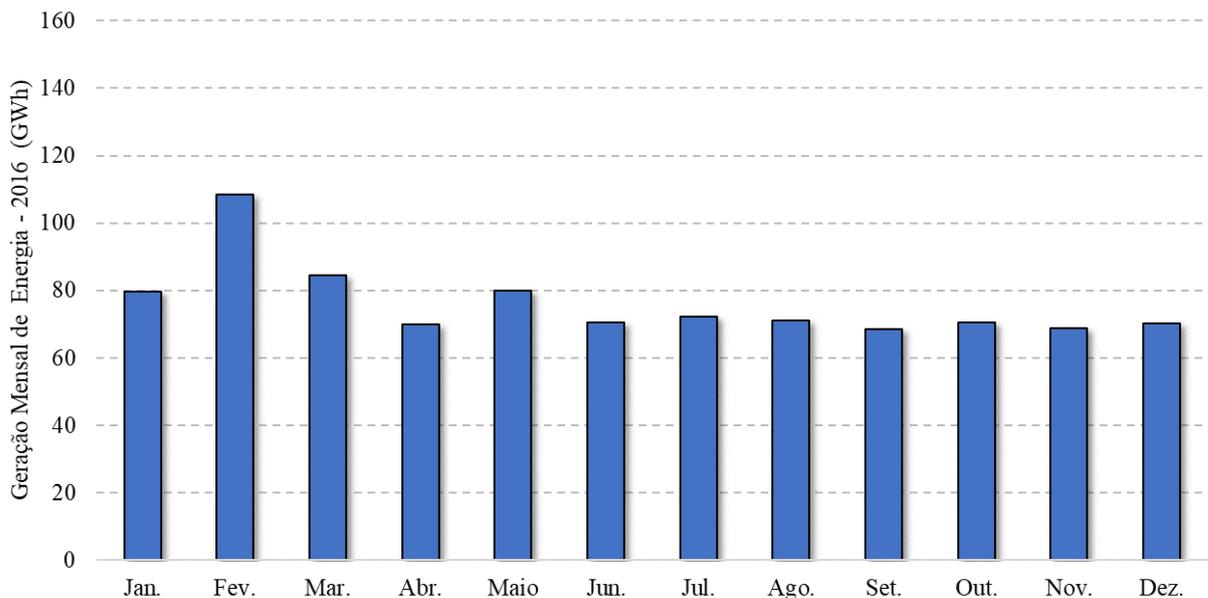


Fonte: [2].

No Gráfico 5 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2016. Assim como em 2015, observa-se que a geração do período chuvoso apresenta comportamento análogo ao não chuvoso. Neste contexto, a produção entre junho e dezembro esteve, aproximadamente, no mesmo patamar.

Em 2016, a maior geração ocorreu em fevereiro (108,41 GWh) e a menor em setembro (68,46 GWh). A média mensal de geração foi de 76,22 GWh, sendo que os meses de janeiro (79,12 GWh), fevereiro (108,41 GWh), março (84,57 GWh) e maio (79,95 GWh) apresentaram geração maior que a média mensal. Em relação à 2015, a produção anual de 2016 foi cerca 8,77% menor. Em janeiro de 2016 foram relatadas anomalias positivas de chuva no subsistema Nordeste, o que justifica um aumento de 13,31% da geração de janeiro de 2016 em relação a dezembro de 2015, contudo em relação a janeiro de 2015 a diferença foi de -25,75% [40].

Gráfico 5 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2016.



Fonte: [2].

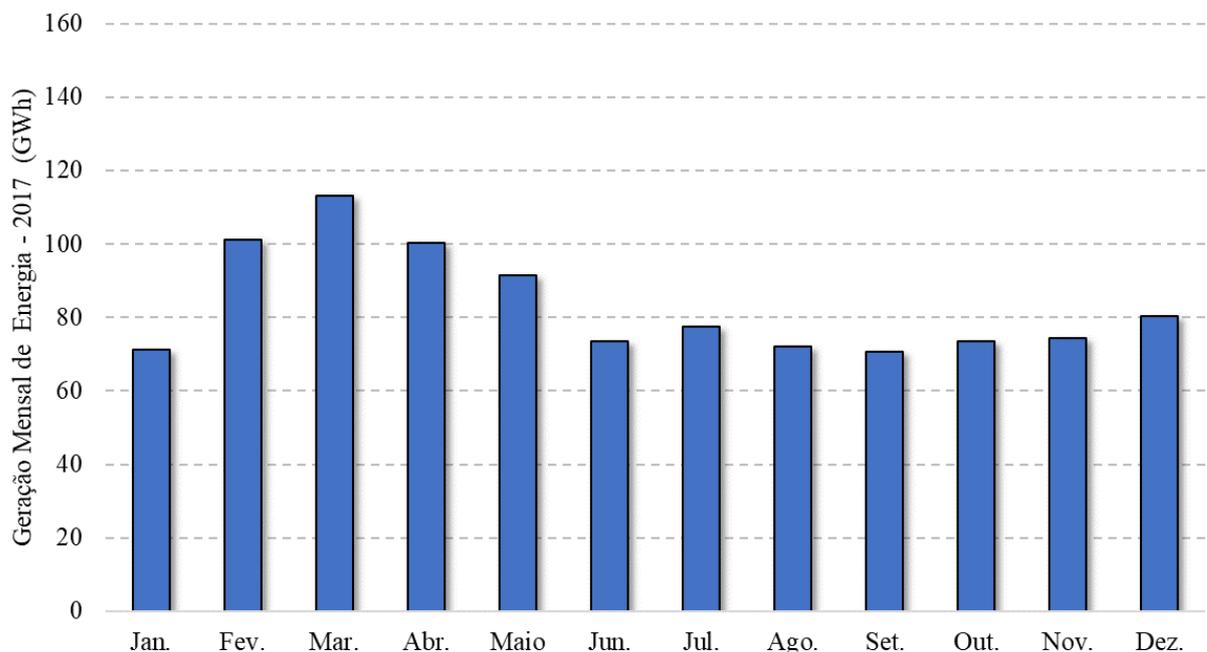
No Gráfico 6 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2017. Diferentemente de 2016, observa-se que a geração do período chuvoso apresenta picos de produção próprios desta época do ano, com exceção de janeiro, o qual teve a pior geração deste mês para os anos analisados, e novembro e dezembro que, apesar dos ganhos, tiveram patamares próximos ao do ano anterior.

Em 2017, a maior geração ocorreu em março (113,19 GWh) e a menor em janeiro (71,27 GWh). A média mensal de geração foi de 83,25 GWh, sendo que os meses de fevereiro

(101,08 GWh), março (113,19 GWh), abril (100,35 GWh) e maio (91,59 GWh) apresentaram geração maior que a média mensal. Em relação à 2016, a produção anual de 2017 foi cerca 9,23% maior.

Nas duas primeiras semanas de dezembro de 2017 foram relatados elevados valores de precipitação nas bacias dos rios Grande, Paranaíba, São Francisco e Tocantins. Tal ocorrido auxilia no entendimento, devido à proximidade geográfica com a bacia do Parnaíba, da tendência de elevação dos valores de produção elétrica da UHE analisada neste trabalho. A título de esclarecimento adicional, a produção no mês e ano supracitados foi 14,20% maior que a do mesmo mês em 2016. [41]

Gráfico 6 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2017



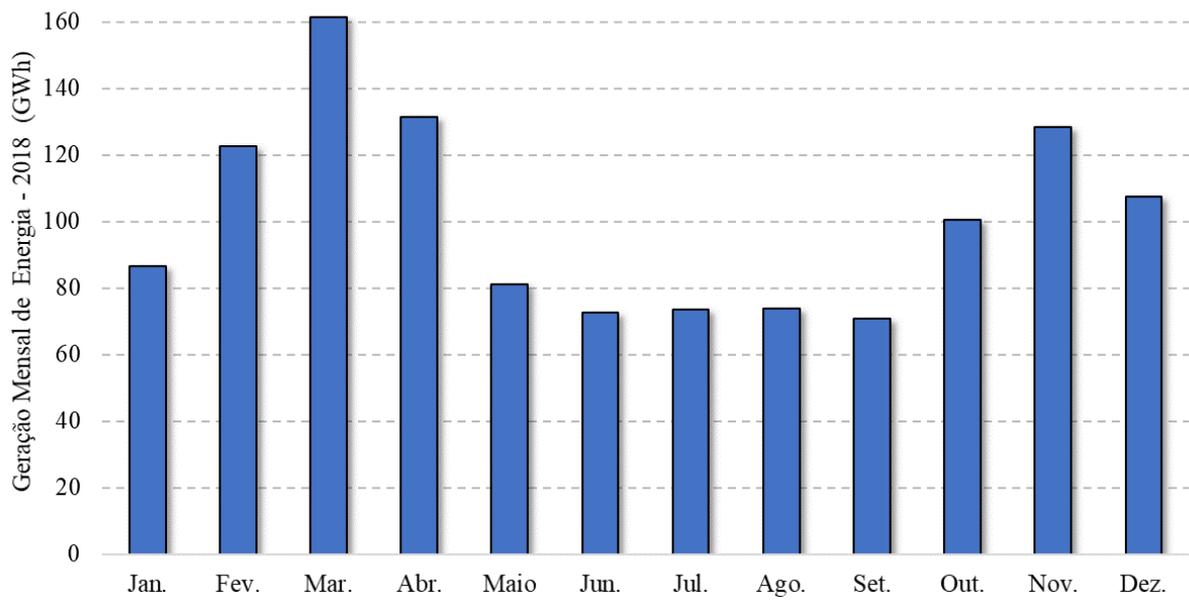
Fonte: [2].

No Gráfico 7 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2018. A continuidade das condições favoráveis observadas nos últimos meses de 2017, em decorrência do fenômeno *La Niña* (o qual teve seu auge no trimestre novembro-dezembro-janeiro), além da ocorrência de dois episódios de ZCAS contribuiu para que o ano de 2018 possuísse uma curva de geração mensal análoga à variação observada entre o período chuvoso e seco [42]. Tal fato não ocorria de forma tão bem definida em anos anteriores devido aos períodos de seca já citados anteriormente.

Neste ano, a maior geração ocorreu em março (161,49 GWh) e a menor em setembro (70,92 GWh). A média mensal de geração foi de 100,87 GWh, em que os meses de

fevereiro (122,70 GWh), março (161,49 GWh), abril (131,43 GWh), novembro (128,38 GWh) e dezembro (107,44 GWh) apresentaram geração maior que a média mensal. Em relação à 2017, a produção anual de 2018 foi, aproximadamente, 21,17% maior.

Gráfico 7 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2018.



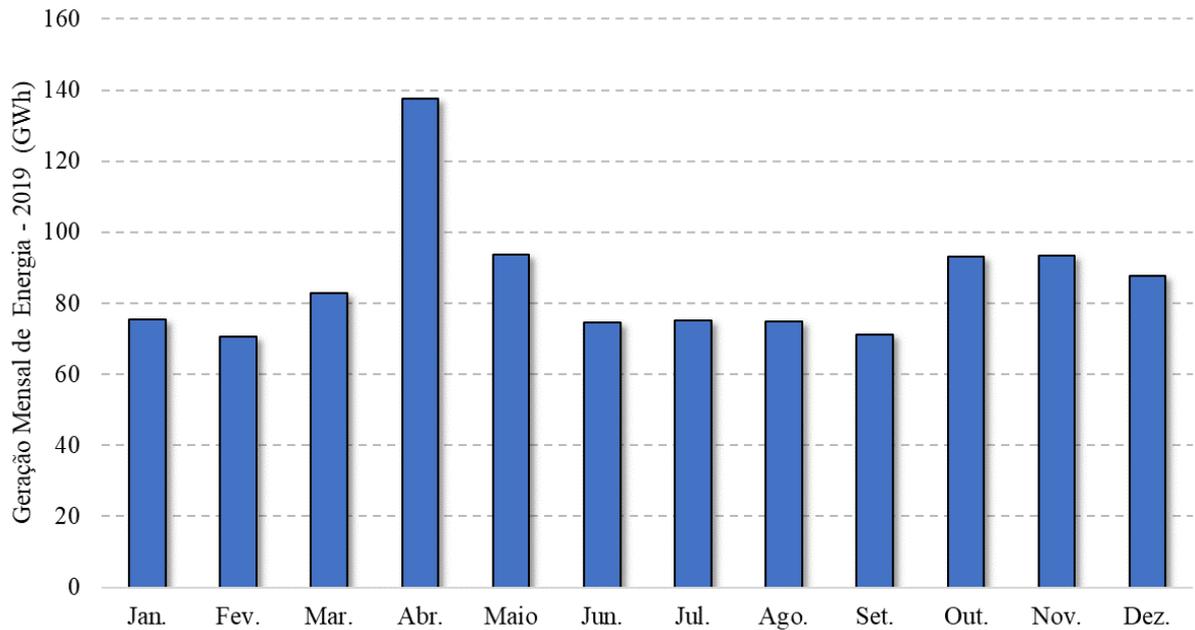
Fonte: [2].

No Gráfico 8 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2019. Assim como em 2018 observa-se que a curva de geração dos períodos chuvoso e seco apresentam comportamento análogo ao regime hidrológico da região, com menor produção entre junho e setembro.

Em 2019, a maior geração ocorreu em abril (137,46 GWh), a qual pode ser explicada pelo nível de Energia Armazenada (EAR) (%), que atingiu os 57,9% ao final do referido mês para o subsistema Nordeste [43], e a menor em fevereiro (70,72 GWh). A média mensal de geração foi de 85,82 GWh, sendo que os meses de abril (137,46 GWh), maio (93,56 GWh), outubro (93,22 GWh), novembro (93,29 GWh) e dezembro (87,65 GWh) apresentaram geração maior que a média mensal. Em relação à 2018, a produção anual de 2019 foi cerca 14,92% menor.

Segundo o Boletim do MME de janeiro de 2019, neste mês predominou no país o cenário de pouca chuva, o que ajuda a elucidar o porquê da geração ter sido 29,89% menor que a do mês anterior e 12,89% menor que a de janeiro de 2018. [44]

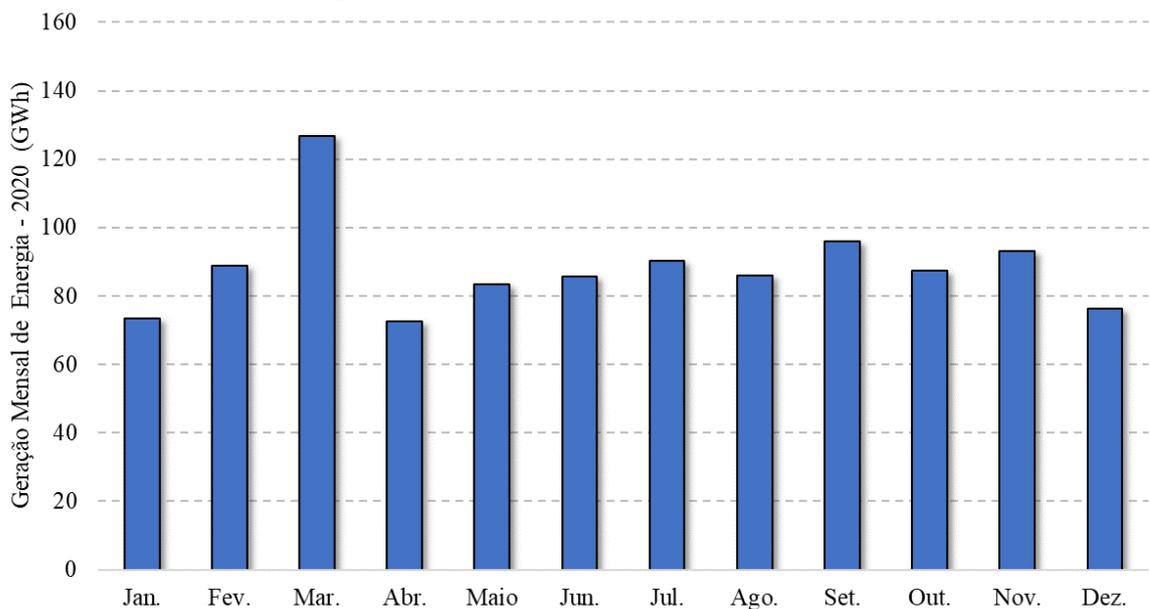
Gráfico 8 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2019.



Fonte: [2].

No Gráfico 9 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2020. Diferentemente de outros anos, a geração neste período teve valores menos definidos entre período chuvoso e seco, tendo em vista que entre maio e novembro os valores observados ultrapassam os 80 GWh.

Gráfico 9 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2020.

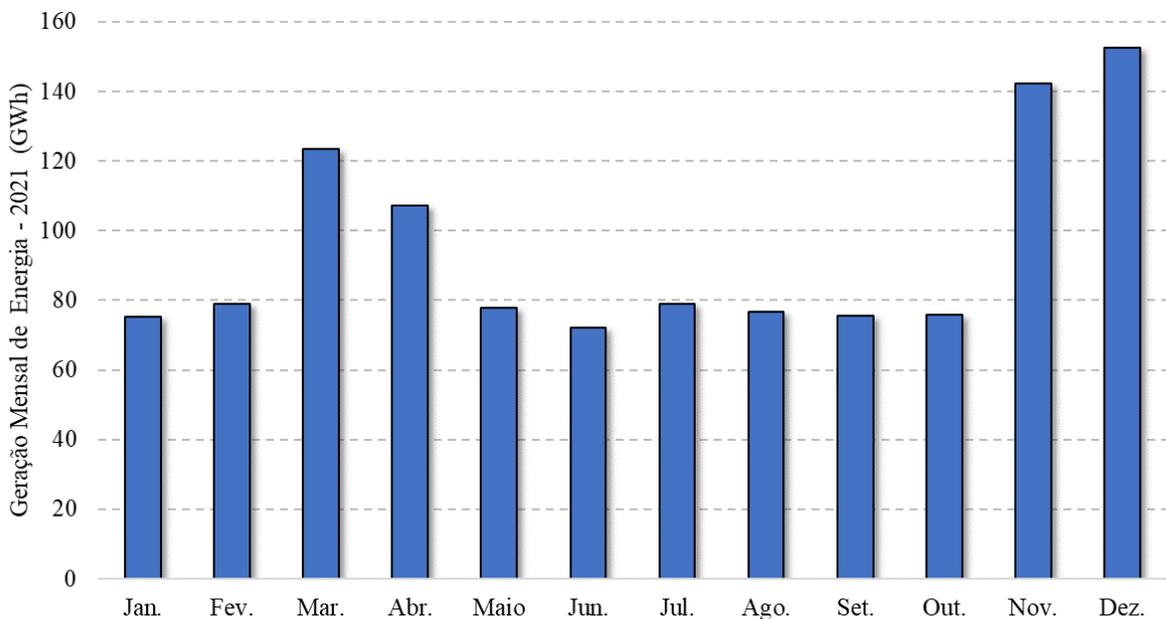


Fonte: [2].

Ainda referente ao Gráfico 9, em 2020, a maior geração ocorreu em março (126,87 GWh) e a menor em abril (72,62 GWh). A média mensal de geração foi de 88,30 GWh. Os meses de fevereiro (88,85 GWh), março (126,87 GWh), julho (90,19 GWh), setembro (95,90 GWh) e novembro (93,12 GWh) apresentaram geração maior que a média mensal. Em relação à 2019, a produção anual de 2022 foi cerca 2,89% maior. Em março de 2020 foram relatadas chuvas acima da média na região Nordeste, o que justifica um aumento de 52,94% da geração no mês supracitado em relação ao equivalente de 2019 [45].

No Gráfico 10 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2021. A geração no referido ano teve valores condizentes com os períodos esperados, tendo em vista o ciclo hidrológico da região, com exceção dos meses de janeiro e fevereiro que tiveram produção análogas ao período seco do mesmo ano. Tal fato se explica pelo baixo índice pluviométrico generalizado no País, no qual se observou, para o mês de janeiro, a pior afluência para o trimestre novembro-dezembro-janeiro no SIN, considerando o histórico desde 1931 [46].

Gráfico 10 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2021.



Fonte: [2].

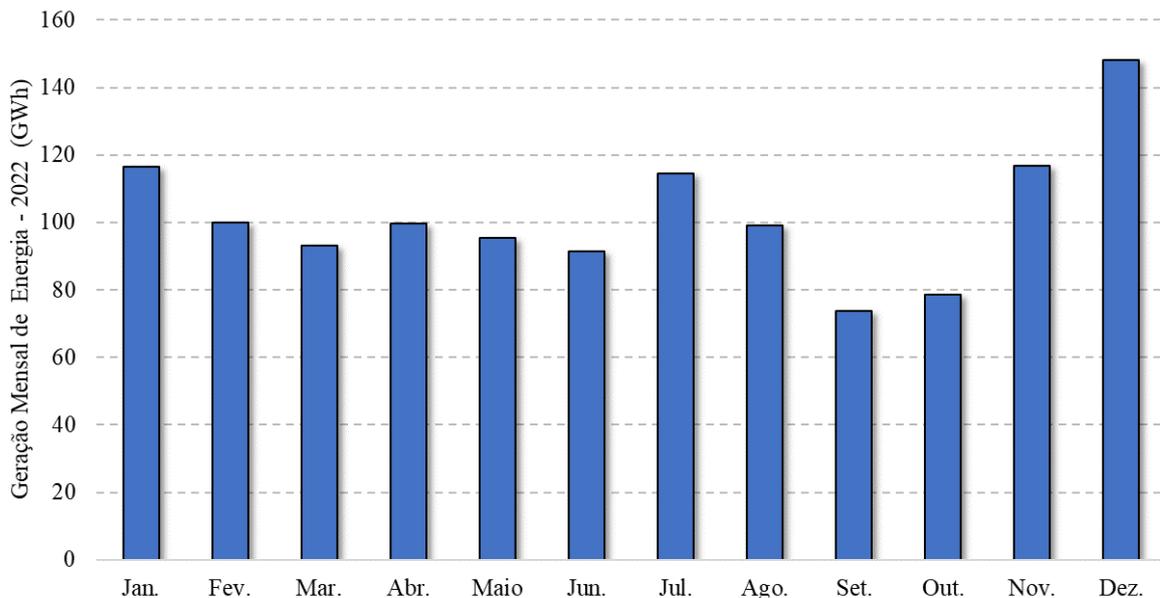
Ainda referente ao Gráfico 10, em 2021, a maior geração ocorreu em dezembro (152,62 GWh) e a menor em junho (72,15 GWh). A média mensal de geração foi de 94,75 GWh, em que os meses de março (123,49 GWh), abril (107,22 GWh), novembro (142,36 GWh)

e dezembro (152,62 GWh) apresentaram geração maior que a média mensal. Em relação à 2020, a produção anual de 2021 foi cerca 7,31% maior.

Em novembro, destacou-se a configuração dos períodos chuvosos em todas as regiões do Brasil. No subsistema Nordeste, no qual está localizada a bacia do Parnaíba, houve um aumento de afluência, possibilitando dar continuidade ao reenchimento dos reservatórios de relevantes usinas hidrelétricas, contribuindo para o armazenamento equivalente [47].

No Gráfico 11 são apresentados os dados mensais de geração de energia elétrica da UHE Boa Esperança no ano de 2022. Observa-se que a geração do período chuvoso apresenta comportamento análogo ao não chuvoso, mas com produções em níveis superiores a 80 GWh/mês em todos os meses, com exceção de setembro e outubro, explicitando as condições hidrológicas favoráveis.

Gráfico 11 – Geração de energia elétrica UHE Boa Esperança - 2022.



Fonte: [2].

Ainda referente ao Gráfico 11, em 2022, a maior geração ocorreu em dezembro (148,20 GWh) e a menor em setembro (73,87 GWh). A média mensal de geração foi de 102,25 GWh, a maior da série histórica analisada, em que os meses de janeiro (116,49 GWh), julho (114,48 GWh), novembro (116,69 GWh) e dezembro (148,20 GWh) apresentaram geração maior que a média mensal. Em relação à 2021, a produção anual de 2022 foi cerca 7,92% maior.

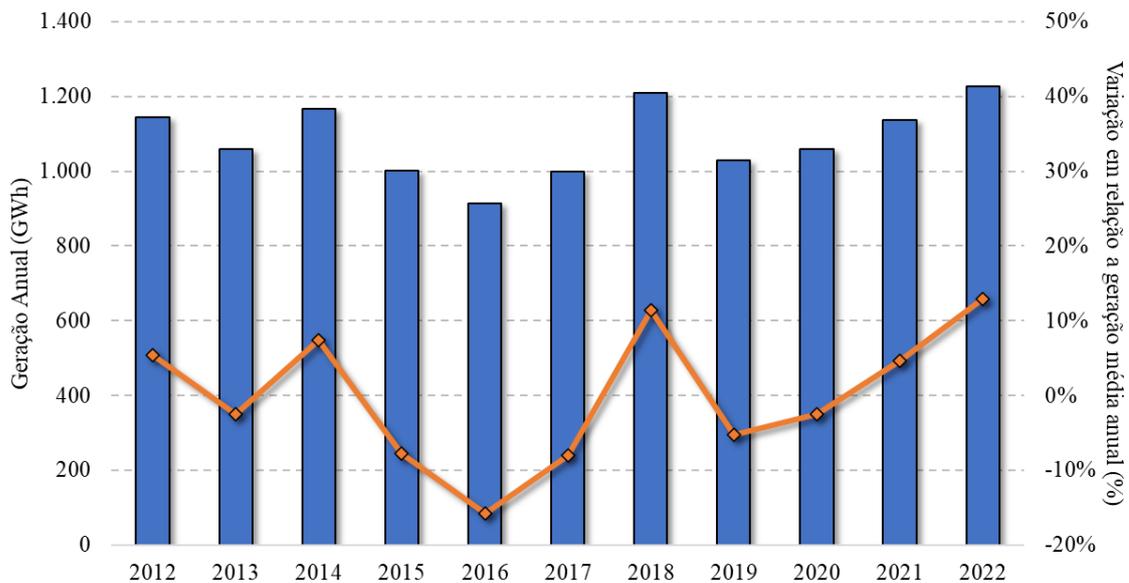
Em janeiro, destacou-se a continuação dos períodos chuvosos em todas as regiões do Brasil e o consequente prosseguimento do reenchimento de reservatórios relevantes. Em comparação ao mesmo mês do ano anterior houve um aumento de 54,96% na geração, no

entanto, no que se refere ao cotejo com os dados de dezembro de 2021, houve uma redução de 23,67% na produção [48].

No Gráfico 12 são apresentadas as produções anuais entre 2012 e 2022, bem como é representado o percentual de acréscimo/decrécimo em relação à média anual do período (1.086,34 GWh).

É verificado que a geração anual em 2013, 2015, 2016, 2017, 2019 e 2020 foi menor do que o valor da média anual. Para este intervalo os anos de 2012, 2014, 2018, 2021 e 2022 apresentaram produção superior à média anual. Os cenários mais críticos de produção são verificados em 2016 (-15,81%), 2017 (-8,04%) e 2015 (-7,72%). Segundo [49] e [50], entre o fim de 2012 e início de 2020 a ocorrência de longos períodos de secas nas principais bacias hídricas nacionais provocaram a redução da participação das hidroelétricas na participação da matriz elétrica, e como consequência foram registrados maiores despachos de termoeletricas e diminuição do volume nos reservatórios das usinas hidroelétricas.

Gráfico 12 – Geração anual da UHE Boa Esperança (2012 – 2022).



Fonte: [2].

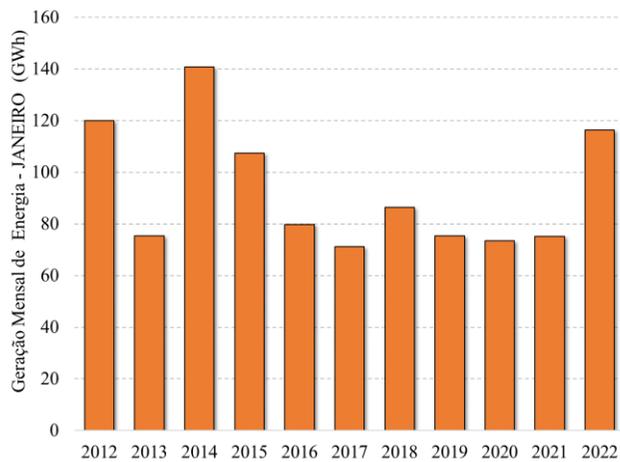
3.1.3.1 Análise da geração mensal da UHE Boa Esperança

Para essa análise são considerados os dados de produção mensal entre janeiro de 2012 e dezembro de 2022. Durante o período especificado a média de produção foi de 90,53 GWh, sendo observado que dos 132 meses analisados 63,64% apresentam produção abaixo da média mensal do período enquanto 36,36% apresentaram produção superior.

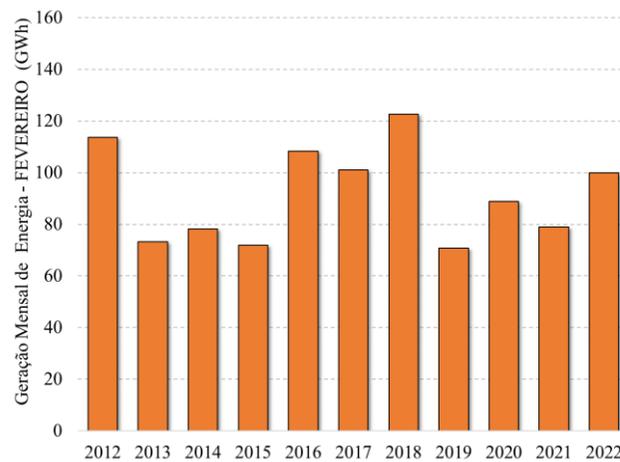
Ao observar o período de 2012-2022 o menor nível de geração na UHE Boa Esperança foi de 68,46 GWh ocorrida em setembro de 2016 que equivale a 75,62% da média de produção do período. Segundo o MME neste período foram registradas precipitações abaixo da média em todas as principais bacias hidrográficas utilizadas para geração de energia elétrica, ademais destaca que o subsistema Nordeste apresentou ENA bruta de 33% MLT, pior valor registrado na série de 84 anos de medições (1931 a 2004) [51]. Já o maior valor de produção ocorreu em março de 2018 atingindo o valor de 161,49 GWh, ou seja, 78,38% maior que a média do período.

Nos Gráficos 13 (a)-(1) é apresentada a tendência de maior produção da UHE Boa Esperança no primeiro semestre e redução da produção durante o segundo semestre. Ademais, observa-se que durante o primeiro semestre de 2013 houve uma inversão dessa tendência em virtude das condições hidrológicas desfavoráveis iniciadas em 2012 [49], [50] e [52]. Além disso, é possível observar que os picos e vales da geração acompanham o regime natural de chuvas da região, fator este primordial para uma boa vazão da UHE. Para exemplificar, os anos de 2017, 2018 e 2019, têm um regime de geração maior nos meses de fevereiro, março e abril, com queda entre maio e setembro.

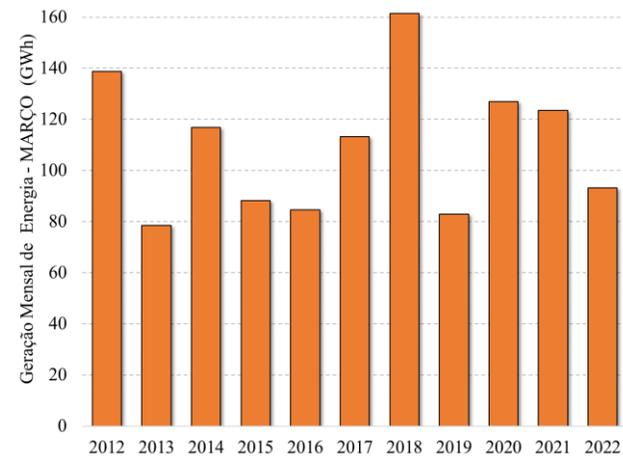
Gráfico 13 – Média histórica anual de produção da UHE Boa Esperança.



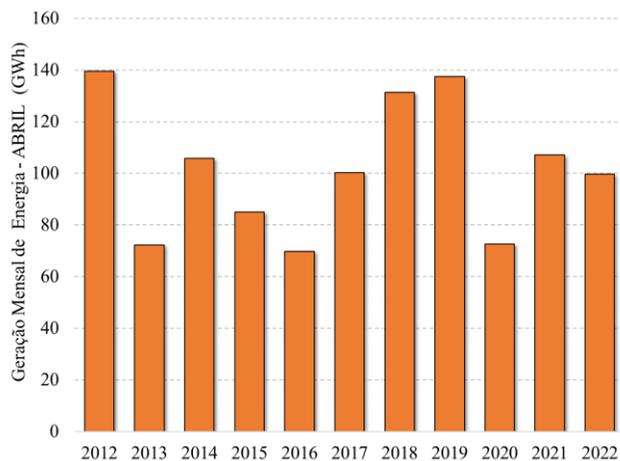
(a)



(b)



(c)



(d)



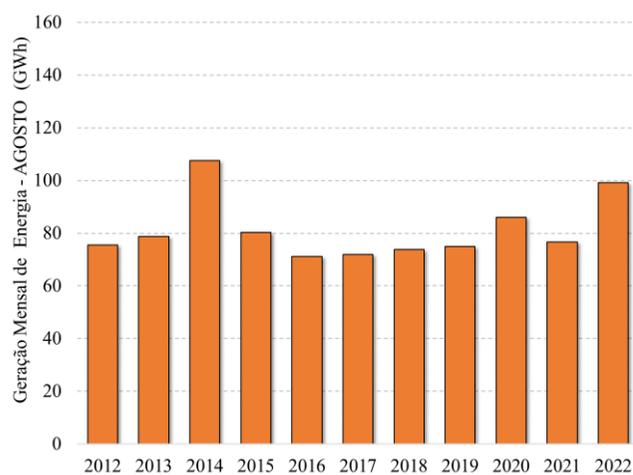
(e)



(f)



(g)



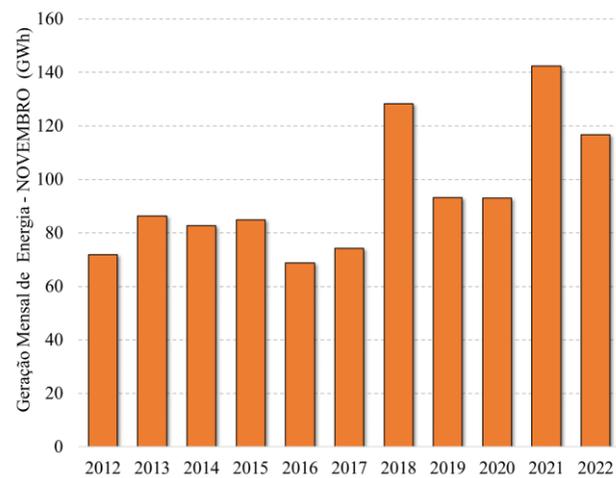
(h)



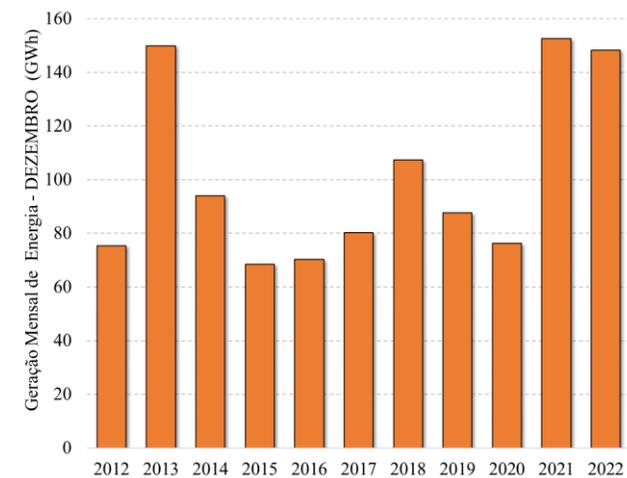
(i)



(j)



(k)



(l)

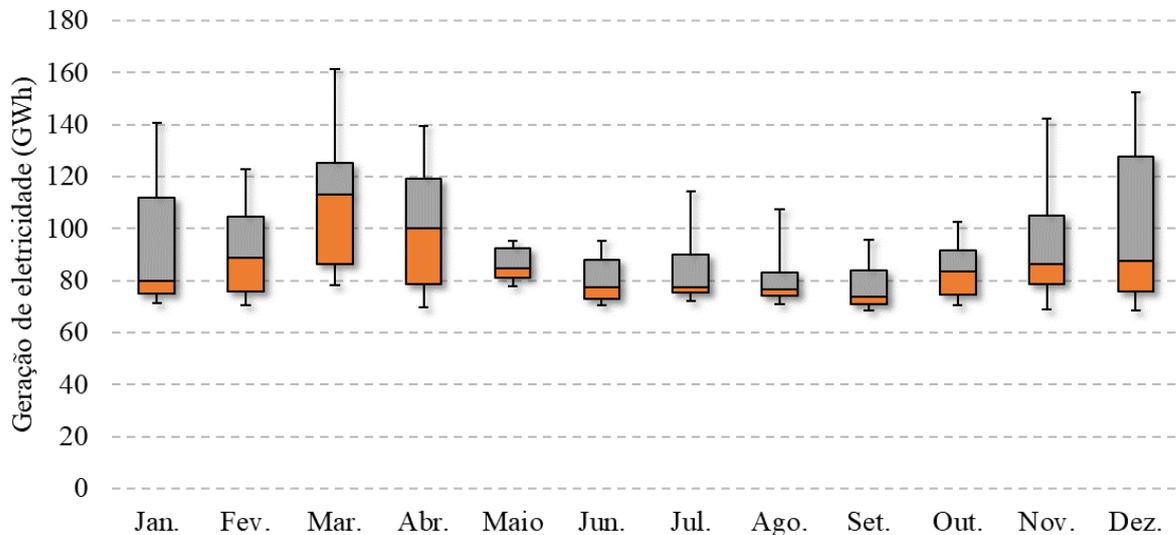
Fonte: [2].

3.1.3.2 Análise da variação da geração da UHE Boa Esperança

Além da análise dos dados em escala anual e mensal é importante que sejam observadas as tendências/variações da geração de energia elétrica no período 2012-2022 afim de tornar mais clara as relações entre geração e eventos climáticos sazonais. No Gráfico 14 são representadas variações mensais da geração durante o período analisado.

Neste gráfico do tipo “boxplot” um conjunto de dados que tem uma distribuição simétrica terá a linha mediana no centro do retângulo, como ocorre no mês de abril e outubro. Quando a linha mediana está mais próxima do nível superior do retângulo os dados são assimétricos positivos, como em março. Para os demais meses a linha está mais próxima do nível inferior, indicando uma assimetria negativa dos dados, ou seja, estes variam em maior parte em valores abaixo da mediana.

Gráfico 14 – Comportamento mensal dos valores de geração da UHE Boa Esperança (2012-2022).

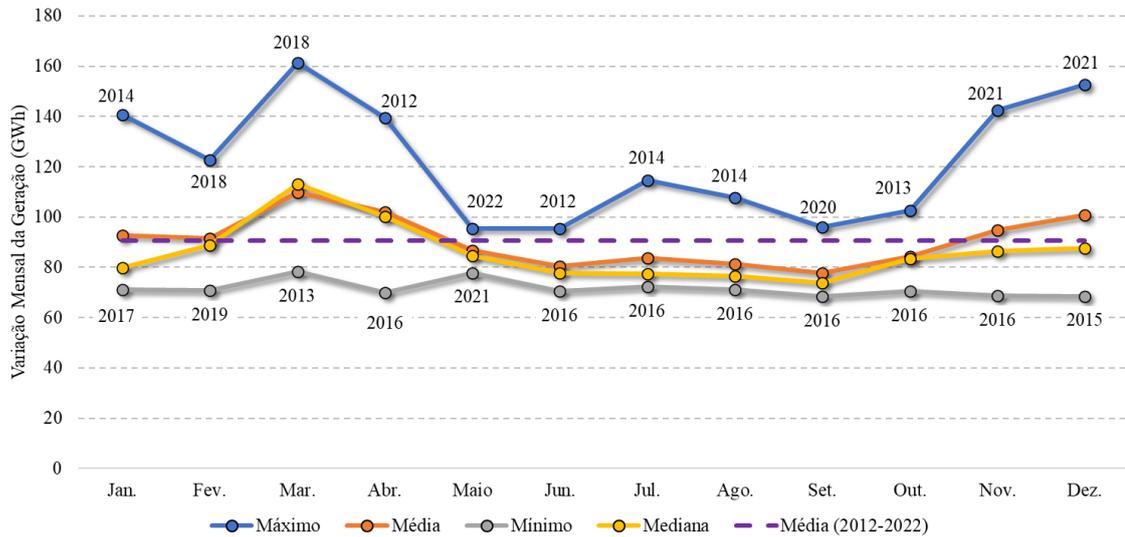


Fonte: [2].

No Gráfico 15 são apresentados os picos de produção, os quais se concentram sobretudo entre os meses de janeiro e abril, voltando a apresentarem valores máximos crescentes em novembro e dezembro. Tal fato justifica-se pela coincidência com o período chuvoso na Região Nordeste, em que tipicamente o valor percentual de EAR nos reservatórios das usinas hidrelétricas apresentam forte tendência de elevação entre janeiro e meados de abril e estabilização/crescimento no final de outubro a dezembro. Assim, por esse mesmo motivo, no período seco no Nordeste (maio a outubro) os valores máximos de produção apresentam

menor magnitude em função da redução da EAR (%), devido à diminuição nos níveis dos reservatórios das usinas.

Gráfico 15 – Comportamento médio mensal dos valores de geração da UHE Boa Esperança.



Fonte: [2].

Ademais, no Gráfico 15, é apresentada a relação entre a média mensal mês a mês (MM), a média mensal total (MMT), a qual considera todos os meses, os valores de produção máximo e mínimo mensais e a mediana. A variação dos valores máximos em relação à MMT é maior que a mesma variação em relação aos valores mínimos nos meses do período chuvoso e em julho. Este mês do período seco só aparece devido ao pico de produção em 2022, o que ajuda a elucidar que as gerações nos meses de mais seca são, geralmente, abaixo da MMT. Além disso, é possível atestar que o mês de maio foi o que os valores de produção foram mais homogêneos, pois foi neste em que a mediana mais se aproximou dos valores mínimo e máximo.

Os meses em que os picos de geração ultrapassaram em mais de 50% a MM foram os de janeiro (51,60%), novembro (50,17%) e dezembro (51,15%). Estes valores foram observados nos anos de 2014, para o primeiro mês do ano, e em 2021, para os dois últimos. Em outra perspectiva, os meses em que os vales de geração foram inferiores a 70% da MM são os de abril (68,52%), em 2016, e dezembro (67,90%), em 2015. Fazendo uma síntese destas informações é possível verificar que dezembro foi o mês, deste período de análise, em que o valor mínimo de geração mais se distanciou da média mês a mês e o segundo considerando a distância ao valor máximo.

Entre os meses de janeiro e abril, a produção média mensal se apresenta com valores superiores ao valor da média (2012-2022), além disso, os valores máximos de produção também são observados nesse mesmo período. Tal tendência já havia sido relatada anteriormente e deve-se à coincidência com o período chuvoso na Região Nordeste. Já entre maio e outubro, caracterizado pelo período de seca, tipicamente a produção média mensal se apresenta menor que o valor médio (2012-2022), a mesma tendência é observada em relação aos valores máximos mensais registrados, onde apresentam tendência de decréscimo (março – maio), estabilização (junho – setembro) e crescimento (outubro - março). Entre novembro e dezembro a média de geração mensal se apresenta acima do valor médio (2012-2022).

É interessante observar, também, que em janeiro e dezembro a mediana se distanciou da média mais do que em outros meses do ano, indicando que o fator possibilitante das médias mensais destes meses serem superiores à média anual foram anos de pico de geração, tais como 2012, 2014, 2015 e 2022 para janeiro e 2013, 2018, 2021 e 2022 para dezembro. Tal análise demonstra, com exceção a 2018, que a produção elevada em dezembro de um ano indica o acontecimento da mesma situação favorável em janeiro do ano seguinte.

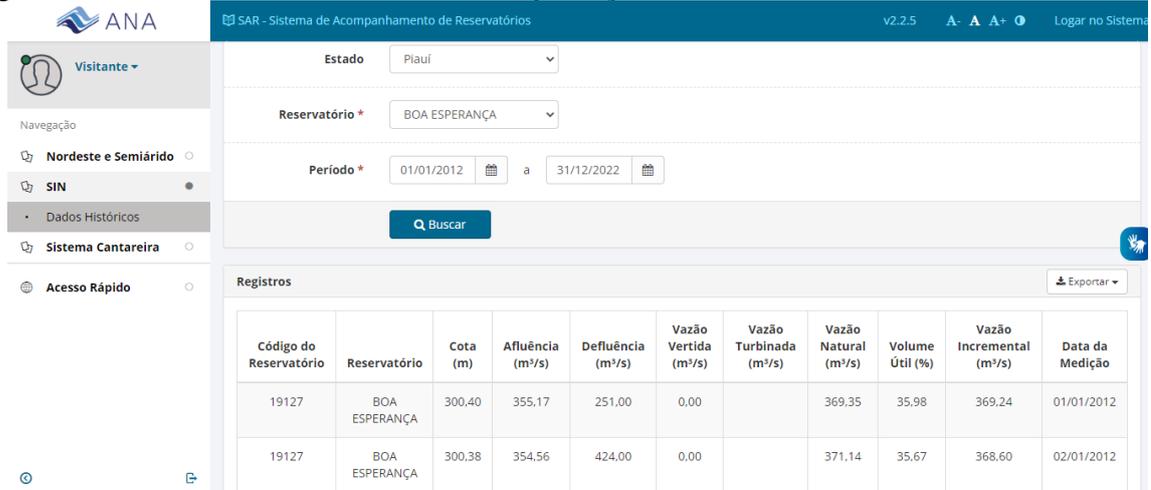
Ao observar os valores mínimos de geração de energia elétrica mensal entre 2012-2022 é verificado que o maior número de ocorrência de valores mínimos ocorre no ano de 2016 (abril, junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro). Segundo o MME nesses meses foram verificados os piores valores de ENA para o sistema Nordeste, para os respectivos períodos, no período 1931-2014 [53].

Com relação aos valores máximos de geração de energia elétrica mensal entre 2012-2022, verificou-se que, apesar de o ano de 2022 ter sido o que teve maior produção anual, somente em maio que este obteve a superioridade com relação aos outros anos. Isso indica que o ano supracitado possuiu um regime de chuvas mais homogêneo.

3.1.4 Definição da área por dados de Cota x Área x Volume

Para essa análise são utilizados os dados de Cota (m), Vazão (m^3/s) e Volume útil (%) do reservatório da UHE Boa Esperança no período 2012-2022. Deste modo, há condições de se observar a área disponível para instalação da planta FVF, utilizando como fonte de pesquisa os registros históricos fornecidos pela ANA. Foi acessada a seção em que é possível observar os dados dos reservatórios do SIN ao longo de um intervalo de tempo pré-determinado, conforme demonstrado para o exemplo em questão na Figura 3 [54].

Figura 3 – Dados do reservatório de Boa Esperança.

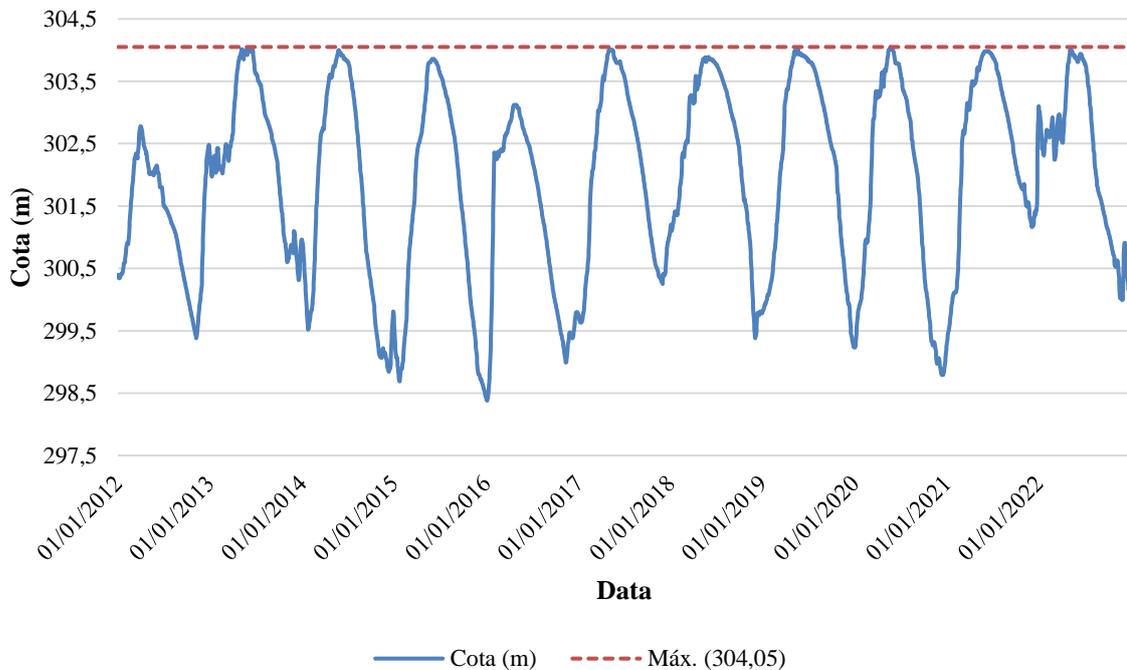


Código do Reservatório	Reservatório	Cota (m)	Afluência (m³/s)	Defluência (m³/s)	Vazão Vertida (m³/s)	Vazão Turbinada (m³/s)	Vazão Natural (m³/s)	Volume Útil (%)	Vazão Incremental (m³/s)	Data da Medição
19127	BOA ESPERANÇA	300,40	355,17	251,00	0,00		369,35	35,98	369,24	01/01/2012
19127	BOA ESPERANÇA	300,38	354,56	424,00	0,00		371,14	35,67	368,60	02/01/2012

Fonte: [54].

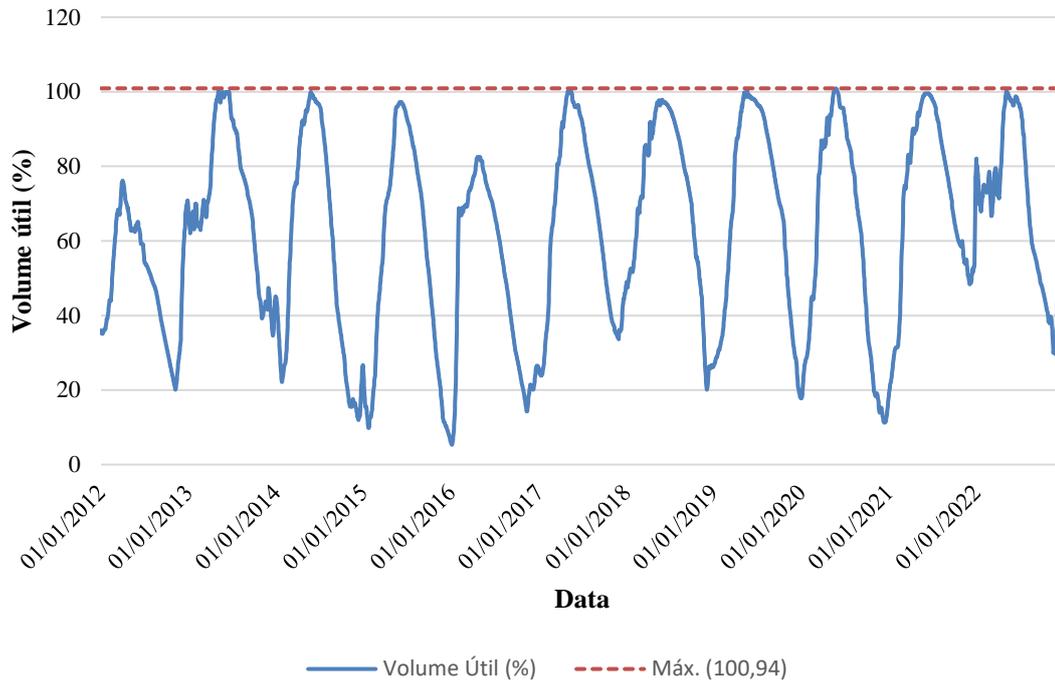
Tendo como base os dados fornecidos em arquivo “excel” pelo site foi possível construir as curvas de evolução de cota e volume útil (Gráficos 16 e 17, respectivamente). As quais são muito importantes para entender mais detalhadamente o comportamento da produção elétrica da usina, além de fornecer dados para a obtenção da área, através da curva Cota x Área x Volume (CAV).

Gráfico 16 – Curva da evolução histórica da Cota.



Fonte: [54].

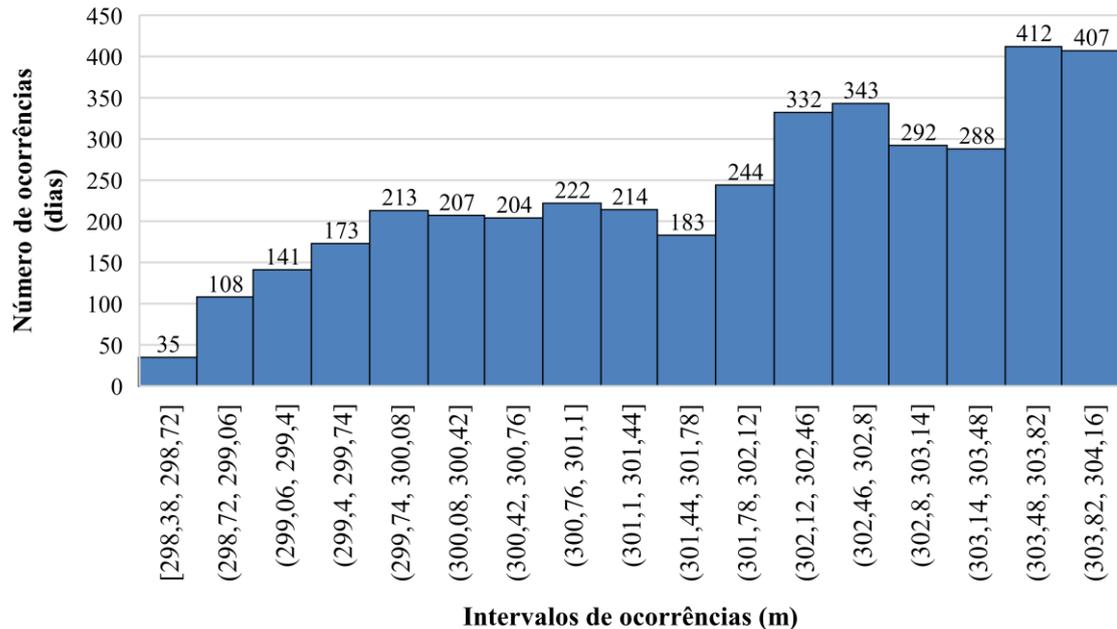
Gráfico 17 – Curva da evolução histórica do volume útil.



Fonte: [54].

Através da análise destas figuras é possível visualizar que as curvas seguem o mesmo padrão, demonstrando que cota e volume têm suas variações ocorrendo de maneira proporcional. Observa-se que o volume útil máximo da série histórica ultrapassou os 100% nos dias 05 e 07 de maio de 2013, 07 de maio de 2017, 19 a 21 maio de 2019, 18 a 30 de maio de 2020 e 05 de maio de 2022, elucidando que os reservatórios de UHEs têm margens superiores e inferiores de operação com relação aos valores nominais. Além disso, através da curva da cota, foi possível elaborar um histograma (Gráfico 18) que apresenta os valores em intervalos de ocorrência, o que servirá de subsídio para a escolha da cota que será utilizada para determinar a área base para o dimensionamento da planta FVF.

Gráfico 18 – Histograma da Cota.

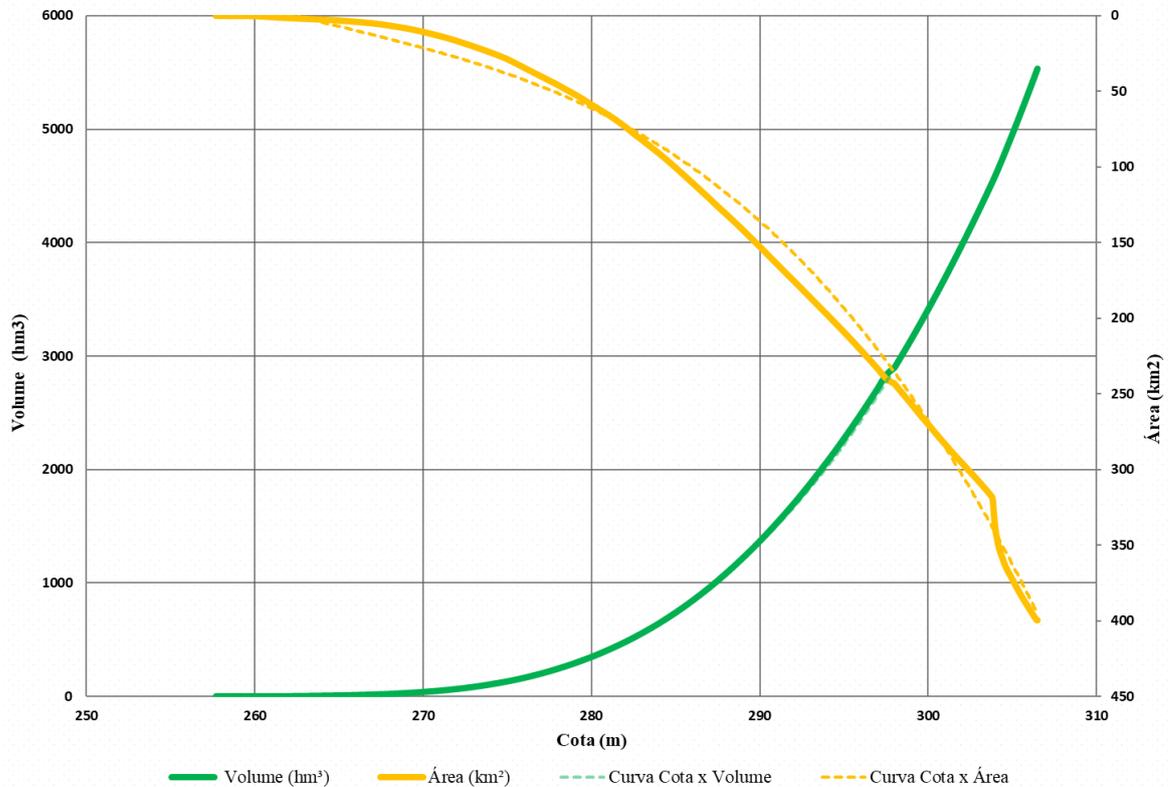


Fonte: [54].

Observando os dados apresentados no Gráfico 18 é possível observar que a cota teve sua variação entre 298,38 m e 304,16 m, ao longo dos 11 anos. O histograma divide por intervalos a quantidade de vezes em que níveis de cota se repetiram. Neste sentido, é possível visualizar que a variação entre 298,38 m e 298,72 m (menores valores da série histórica em questão) foi contabilizada em 35 dias, dos quais 32 foram entre os dias 12/12/2015 e 12/01/2016, período em que o reservatório chegou a atingir 5% da sua capacidade, patamar mais baixo da história, conforme noticiado em [55].

Para obtenção da área através das cotas apresentadas, A ANA, através do seu Catálogo de Metadados, fornece a tabela atualizada Cota (m) x Área (km²) x Volume (hm³) com as curvas Área x Cota e Volume x Cota. Isso se dá devido à resolução conjunta ANA/ANEEL n° 03/2010 a qual estabelece que as UHEs despachadas centralizadamente pelo ONS ao completar 10 anos em operação comercial devem realizar a avaliação do assoreamento dos seus reservatórios com a atualização da tabela supracitada. No Gráfico 19 é possível visualizar as curvas CAV, na qual serão analisados os dados da sinuosidade que se refere à área, conforme equação (1), em que x é a cota [56].

Gráfico 19 – Curvas Cota x Área x Volume da UHE Boa Esperança.



Fonte: [56].

A equação que caracteriza a curva da área, objeto de estudo deste tópico, é:

$$\text{Área} = 0,0038237035x^3 - 3,0388564084x^2 + 807,7693510034x - 71.805,8356622626 \quad (1)$$

Isto posto, é possível fazer um cruzamento entre os dados da série histórica para a cota com os da curva Cota x Área de tal forma que seja definido um valor de área para os cálculos posteriores deste estudo.

Entende-se que o valor de cota a ser adotado será 298,38 m, pois representa a medida diária mínima observada entre os anos 2012 e 2022. Apesar de este dado estar presente em um intervalo que representa apenas 0,87% do total, conforme apresentado no histograma, deve-se compreender que não foi feito um adequado estudo de batimetria do local, o qual auxiliaria na definição da área ideal para esta instalação. Portanto, ao escolher a cotação mínima, optou-se pela máxima segurança para instalação da planta FVF.

Ao analisar o valor de cota correspondente ao definido anteriormente, pode-se definir a área a ser utilizada como 248,30 km². Todavia, de acordo com [57], 34% da área total definida para instalação da usina solar deve ser destinada ao espaçamento entre os flutuadores, devido à zona reservada para movimentação dos técnicos.

3.2 Formulação matemática da capacidade instalada

Com a finalidade de calcular o número de módulos e a potência da planta FVF, tendo em mãos valor de A_{fvf} , deve-se definir o módulo que será utilizado no projeto. Diante disto, tendo em vista a disponibilidade no mercado para fins de instalações em usinas de grande porte e as condições de instalação, adotou-se, para o primeiro caso, um módulo mais tradicional e utilizado a alguns anos, além de ser de uma das empresas com maior volume de módulos vendidos no Brasil. Ou seja, um módulo de 480Wp de potência nominal e área do módulo (A_{mod1}) igual a 2,16 m², aproximadamente. Para o segundo caso, adotou-se um módulo *PERC* de 665 Wp de potência nominal e área do módulo (A_{mod2}) igual a 3,11 m², aproximadamente. Esta escolha se deu porque este módulo é considerado um produto “top de linha”, o qual garantirá a usina um dimensionamento atualizado em relação à disponibilidade do mercado por muitos anos.

Por fim, a geração de eletricidade pode ser determinada utilizando o valor de Fator de Capacidade (FC) para o dimensionamento dos sistemas propostos, o qual é igual a 22%. Este valor representa a média aproximada dos valores observados para as usinas solares do SIN no estado do Piauí no período de 2012 – 2022 [58].

4 DIMENSIONAMENTO DA USINA FVF

Com base nas informações apresentadas anteriormente, o presente capítulo tem em vista o dimensionamento do sistema FVF considerando três cenários de ocupação da área delimitada. O cenário 1 corresponde ao preenchimento de 1% da área útil, enquanto os outros dois cenários observam a 5% e 10% dela.

4.1 Apresentação e descrição das equações utilizadas

Para o cálculo da potência instalada (P_{inst}) é necessária a definição da quantidade de módulos a serem utilizados, de acordo com a eq. (2). Nesta equação, “x” representa o valor percentual de ocupação de acordo com cada cenário e a área dos módulos FV são as apresentadas no capítulo anterior, as quais foram indicadas nos catálogos dos fabricantes (ANEXOS A e B). A_{fvf} , por sua vez, representa a área útil de acordo com as condições definidas por [56], a qual foi definida como 163,88 km².

Ademais, vale ressaltar que as perdas gerais do sistema FVF não estão sendo consideradas, devido à dificuldade de mensurá-las e ao fato de se tratar de um tipo de sistema recente no mercado, o qual não possui muitos estudos a este respeito.

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{A_{fvf} \times x(\%)}{A_{mod}} \quad (2)$$

A eq. (3), por sua vez, utilizando-se do resultado obtido em (2) e da potência de um módulo FV, irá definir a P_{inst} para todos os cenários.

$$P_{inst} = N^{\circ} \text{ de módulos} \times Pot_{mod} \quad (3)$$

Ademais, na eq. (4) a estimativa de geração anual é calculada através da potência instalada do sistema e do FC adotado, além do valor 8760, o qual corresponde ao número de horas em um ano.

$$E_{ano} = F.C \times P_{inst} \times 8760 \quad (4)$$

4.2 Cenários utilizando o módulo de 480 Wp

Definiu-se que, em primeiro lugar, apresentar-se-ão os cenários com diferentes níveis de ocupação na construção de uma usina FVF com os módulos de 480 Wp. Além disso, definiu-se, para fins de simplificação dos cálculos, a utilização de A_{fvf} em metros.

4.2.1 Cenário 1.1

Neste cenário, ao considerar a utilização de 1% de A_{fvf} , a quantidade de módulos necessárias será de:

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{163.880.000,00 \times 1\%}{2,16} = \mathbf{758.703,70}$$

No entanto, é preciso a utilização de um número inteiro para a quantidade de módulos FV. Logo, adotou-se para este cenário o uso de 758.703 módulos, pois o valor imediatamente superior implicaria em “x” superior a 1%, distanciando-se da proposição do cenário.

Quando aplicado o resultado acima em (3), tem-se que a potência instalada é de:

$$P_{inst} = 758.703 \times 480 = \mathbf{364,18 MWp}$$

Isto posto, é imprescindível estimar a geração desta usina FVF através da equação (4), tendo em vista a P_{inst} calculada. Portanto, a geração de energia elétrica anual é:

$$E_{ano} = 364,18 \times 0,22 \times 8760 = \mathbf{701,85 GWh}$$

4.2.2 Cenário 1.2

Neste cenário, ao considerar a utilização de 5% de A_{fvf} , a quantidade de módulos necessárias será de:

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{163.880.000,00 \times 5\%}{2,16} = \mathbf{3.793.518,22}$$

No entanto, é preciso a utilização de um número inteiro para a quantidade de módulos. Logo, adotou-se para este cenário o uso de 3.793.518 módulos, pois o valor imediatamente superior implicaria em “x” superior a 5%, distanciando-se da proposição do cenário.

Quando aplicado o resultado acima em (3), tem-se que a potência instalada é de:

$$P_{inst} = 758.703 \times 480 = \mathbf{1.820,89 MWp}$$

Isto posto, é imprescindível estimar a geração desta usina FVF através da equação (4), tendo em vista a P_{inst} calculada. Portanto, a geração de energia elétrica anual é:

$$E_{ano} = 1.820,89 \times 0,22 \times 8760 = \mathbf{3.509,22 GWh}$$

4.2.3 Cenário 1.3

Neste cenário, ao considerar a utilização de 10% de A_{FVF} , a quantidade de módulos necessárias será de:

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{163.880.000,00 \times 10\%}{2,16} = \mathbf{7.587.037,04}$$

No entanto, é preciso a utilização de um número inteiro para a quantidade de módulos. Logo, adotou-se para este cenário o uso de 7.587.037 módulos, pois o valor imediatamente superior implicaria em “x” superior a 10%, distanciando-se da proposição do cenário.

Quando aplicado o resultado acima em (3), tem-se que a potência instalada é de:

$$P_{inst} = 758.703 \times 480 = \mathbf{3.641,78 MWp}$$

Isto posto, é imprescindível estimar a geração desta usina FVF através da equação (4), tendo em vista a P_{inst} calculada. Portanto, a geração de energia elétrica anual é:

$$E_{ano} = 3.641,78 \times 0,22 \times 8760 = \mathbf{7.018,43 GWh}$$

4.3 Cenário utilizando o módulo de 665 Wp

Nos pontos que se seguem observar-se-ão os cenários com diferentes níveis de ocupação na construção de uma usina FVF com os módulos de 655 Wp. Além disso, definiu-se, para fins de simplificação dos cálculos, a utilização de A_{fvf} em metros.

4.3.1 Cenário 2.1

Neste cenário, ao considerar a utilização de 1% de A_{fvf} , a quantidade de módulos necessárias será de:

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{163.880.000,00 \times 1\%}{3,11} = \mathbf{526.945,34}$$

No entanto, é preciso a utilização de um número inteiro para a quantidade de módulos. Logo, adotou-se para este cenário o uso de 526.945 módulos, pois o valor imediatamente superior implicaria em “x” superior a 1%, distanciando-se da proposição do cenário.

Quando aplicado o resultado acima em (3), tem-se que a potência instalada é de:

$$P_{inst} = 526.945 \times 665 = \mathbf{350,42 MWp}$$

Isto posto, é imprescindível estimar a geração desta usina FVF através da equação (4), tendo em vista a P_{inst} calculada. Portanto, a geração de energia elétrica anual é:

$$E_{ano} = 350,42 \times 0,22 \times 8760 = \mathbf{675,33 GWh}$$

4.3.2 Cenário 2.2

Neste cenário, ao considerar a utilização de 5% de A_{fvf} , a quantidade de módulos necessárias será de:

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{163.880.000,00 \times 5\%}{3,11} = \mathbf{2.634.726,69}$$

No entanto, é preciso a utilização de um número inteiro para a quantidade de módulos. Logo, adotou-se para este cenário o uso de 2.634.726 módulos, pois o valor imediatamente superior implicaria em “x” superior a 5%, distanciando-se da proposição do cenário.

Quando aplicado o resultado acima em (3), tem-se que a potência instalada é de:

$$P_{inst} = 2.634.726 \times 665 = \mathbf{1.752,09 MWp}$$

Isto posto, é imprescindível estimar a geração desta usina FVF através da equação (4), tendo em vista a P_{inst} calculada. Portanto, a geração de energia elétrica anual é:

$$E_{ano} = 1.752,09 \times 0,22 \times 8760 = \mathbf{3.376,63 GWh}$$

4.3.3 Cenário 2.3

Neste cenário, ao considerar a utilização de 10% de A_{FVF} , a quantidade de módulos necessárias será de:

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{163.880.000,00 \times 10\%}{3,11} = \mathbf{5.269.453,38}$$

No entanto, é preciso a utilização de um número inteiro para a quantidade de módulos. Logo, adotou-se para este cenário o uso de 5.269.453 módulos, pois o valor imediatamente superior implicaria em “x” superior a 10%, distanciando-se da proposição do cenário.

Quando aplicado o resultado acima em (3), tem-se que a potência instalada é de:

$$P_{inst} = 5.269.453 \times 665 = \mathbf{3.504,19 MWp}$$

Isto posto, é imprescindível estimar a geração desta usina FVF através da equação (4), tendo em vista a P_{inst} calculada. Portanto, a geração de energia elétrica anual é:

$$E_{ano} = 3.504,19 \times 0,22 \times 8760 = \mathbf{6.753,27 GWh}$$

4.4 Resumo dos resultados obtidos

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os dados obtidos para os cenários calculados, os quais possuem 163,88 km² de área útil para os cálculos percentuais de uso do corpo d'água.

Tabela 2 – Resumo dos resultados para a usina FVF com módulos de 480 Wp.

Cenário	Percentual de área utilizado (%)	Nº de módulos	Pinst (MWp)	Produção anual de energia elétrica (GWh)
1	1	758.703	364,18	701,84
2	5	3.793.518	1.820,89	3.509,22
3	10	7.587.037	3.641,78	7.018,43

Fonte: Próprio autor.

Tabela 3 – Resumo dos resultados para a usina FVF com módulos de 665Wp.

Cenário	Percentual de área utilizado (%)	Nº de módulos	Pinst (MWp)	Produção anual de energia elétrica (GWh)
1	1	526.945	350,42	675,33
2	5	2.634.726	1.752,09	3.376,63
3	10	5.269.453	3.504,19	6.753,27

Fonte: Próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são analisados os dados obtidos no dimensionamento realizado para os diferentes cenários de construção da usina FVF, levando-se em consideração a utilização de dois tipos de módulos FV diferentes. Para fins de medição da real capacidade das plantas projetadas são feitos comparativos entre as potências instaladas destas e da UHE de Boa Esperança. Além disso, são feitas análises do impacto dos variados cenários no que concerne a diferentes aspectos do setor elétrico no Brasil, no Nordeste, no Ceará e no Piauí.

5.1 Comparativo com os dados da UHE de Boa Esperança

A partir dos dados obtidos no capítulo de metodologia, pôde-se construir as Tabelas 4 e 5, as quais expõem os percentuais de capacidade instalada e a geração anual da usina FVF, nos diferentes cenários, em comparação com o que já existe na UHE de Boa Esperança. Para esta finalidade, adotou-se o observado anteriormente, ou seja, capacidade instalada da UHE de 237,3 MW e geração anual média, para o período de 2012 a 2022, de 1.086,34 GWh.

Tabela 4 – Comparação das capacidades instaladas da FVF e da UHE de Boa Esperança.

Cenários	% de Área ocupada (Afvf)	Capacidade Instalada FVF (MWp)	% da Capacidade Instalada da UHE
1.1	1%	364,18	133,25%
2.1	1%	350,42	128,22%
1.2	5%	1.820,89	666,26%
2.2	5%	1.752,09	641,09%
1.3	10%	3.641,78	1332,52%
2.3	10%	3.504,19	1282,18%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 – Comparação das gerações anuais da FVF e da UHE de Boa Esperança.

Cenários	% de Área ocupada (Afvf)	Geração anual FVF (GWh)	% da Geração anual média da UHE (2012-2022)
1.1	1%	701,84	64,61%
2.1	1%	675,33	62,17%
1.2	5%	3.509,22	323,03%
2.2	5%	3.376,63	310,83%
1.3	10%	7.018,43	646,06%
2.3	10%	6.753,27	621,65%

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 4 fica notório o potencial das plantas FVF projetadas, pois, já nos cenários iniciais (1.1 e 2.1), verifica-se que a capacidade instalada da usina, ocupando uma área de apenas 1% do lago, ultrapassa em mais de 25% a capacidade instalada da UHE. Para os outros contextos de instalação (com 5% e 10% de área ocupada), observa-se que a planta FVF em questão ultrapassa, em potência instalada, mais de 5 vezes o valor da usina hidráulica para o segundo caso e em mais de 11 vezes para o terceiro caso.

Isto posto, entende-se que, devido à potência da usina FVF ser maior em todos os cenários, é necessária uma análise da viabilidade desta instalação tomando em consideração a disponibilidade na Subestação (SE) de Boa Esperança e na rede de transmissão do SIN. Este estudo não é objeto de investigação deste documento e recomenda-se que seja feita esta continuidade em trabalhos posteriores.

Analisando a Tabela 5 fica notória a diferença entre as características de produção entre a geração FVF e hidráulica. Enquanto a capacidade instalada das usinas FVF projetadas foram maiores em todos os cenários, a geração hidráulica média anual é maior que a solar em dois dos seis cenários propostos. Isto ocorre devido ao caráter intermitente da geração FV, o que torna o FC desta bem menor que o de uma fonte hídrica, conforme informação citada abaixo.

O Anexo PNE 2050, elaborado pela EPE, considerou, para as simulações de expansão de UHEs, um FC médio de 55%. [3] Em contrapartida, o FC médio considerado para este projeto de usina FVF foi de 22%, conforme explicação enunciada no capítulo de metodologia. Este fator, somado a outras questões, como a diferença de eficiência entre os módulos FV e as turbinas da UHE, explicam as diferenças percentuais observadas entre as Tabelas 4 e 5.

Além disso, é importante ressaltar que as perdas do sistema FVF não estão sendo consideradas, conforme exposto no capítulo de dimensionamento, o que indica que a geração real será menor que a exposta neste e nos outros exemplos desta seção. No entanto, estes valores de geração propostos são capazes de fornecer uma boa ideia do potencial da planta em questão.

5.2 Comparativo com os dados do Brasil

Diversos trabalhos realizados na área de usinas FVF fazem análises do potencial de geração fazendo comparações com os índices de geração e consumo de países e estados, como o que foi feito em [27], por exemplo. Adotou-se, então, a mesma metodologia para mensurar o potencial das usinas projetadas, conforme cálculos apresentados abaixo.

5.2.1 Análise considerando o histórico de geração de eletricidade do País

Na Tabela 6 são apresentados os dados de geração anual, em GWh, das usinas FVF propostas e do Brasil, considerando o valor exposto no capítulo anterior e no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023, desenvolvido pela EPE. Este relatório está em formato de *dashboard*, o que possibilita o *download* dos dados e análises mais criteriosas [59].

Em 2022, o Brasil produziu 677.436,87 GWh de energia elétrica, considerando todas as fontes de geração, o que representa o maior índice da série histórica de 2013 a 2022. O Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023 indica que a produção de energia elétrica por plantas FV cresceu em 79,8% de 2021 para 2022, enquanto fontes não-renováveis, como petróleo e carvão, reduziram em 57,2% e 54,6%, respectivamente [59].

Os dados supracitados indicam a tendência de investimento em sistemas FV no País. Corroborando com este cenário, a usina FVF proposta, para o cenário de uso de apenas 10% da área definida anteriormente, representa 1% da geração de energia elétrica do País, considerando todas as fontes de produção em 2022. Tal fato incorre na ideia de que a planta em questão auxiliaria na tendência de crescimento da produção FV no território nacional e no suprimento das diversas necessidades da Nação.

Tabela 6 – Comparação das gerações anuais da usina FVF e do Brasil.

Cenários	% de Área ocupada (Afvf)	Geração anual FVF (GWh)	% da Geração anual do Brasil (2022)
1.1	1%	701,84	0,10%
2.1	1%	675,33	0,10%
1.2	5%	3.509,22	0,52%
2.2	5%	3.376,63	0,50%
1.3	10%	7.018,43	1,04%
2.3	10%	6.753,27	1,00%

Fonte: Próprio autor.

5.2.2 Análise considerando o histórico da capacidade instalada FV do País

Na Tabela 7 são apresentados os dados de capacidade instalada dimensionada para os diferentes cenários propostos no capítulo anterior com a finalidade de fazer uma análise comparativa entre estes valores e os de capacidade instalada de sistemas FV no Brasil em 2022. É importante observar que estes dados obtidos em [59], ao serem confrontados com os números fornecidos pela ABSOLAR em [4], indicam valores que fazem referência à GC nacional. Ou seja, a GD não foi considerada na construção da Tabela exposta no *dashboard* da EPE.

Em 2022, o País, de acordo com o que foi fornecido pela EPE, terminou o ano com 7.387,11 MW de capacidade instalada, um crescimento de 59,5% em relação ao ano anterior. Neste âmbito, a instalação de uma usina FVF na barragem da UHE de Boa Esperança, considerando as seguintes condições: uso de apenas 10% de A_{fvf} (valor definido no capítulo anterior) e módulos de 480 Wp, representa um ganho de quase 50% em relação ao existente, conforme observado na Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação das capacidades instaladas da FVF e de sistemas FVF do Brasil.

Cenários	% de Área ocupada (A_{fvf})	Capacidade Instalada FVF (MWp)	% da Capacidade Instalada de sistemas FV do Brasil (2022)
1.1	1%	364,18	4,93%
2.1	1%	350,42	4,74%
1.2	5%	1.820,89	24,65%
2.2	5%	1.752,09	23,72%
1.3	10%	3.641,78	49,30%
2.3	10%	3.504,19	47,44%

Fonte: Próprio autor.

5.2.3 *Análise considerando o histórico de geração total dos sistemas FV do País*

Na Tabela 8 são apresentados os dados de geração anual, em GWh, das usinas FVF propostas e de sistemas FV do Brasil, considerando o valor exposto pela EPE no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023 [59].

Em 2022, considerando apenas sistemas FV de GC, o Brasil produziu 30.126,46 GWh de energia elétrica, o maior índice da série histórica de 2013 a 2022, indicando a tendência de crescimento já citada anteriormente. Desta forma, ao fazer o confronto entre os dados obtidos no dimensionamento e este valor recorde, tem-se que o percentual de contribuição dos diferentes cenários varia entre 2,24% e 23,30%.

Vale ressaltar que o máximo valor de A_{fvf} considerado foi de 10% e que se trata apenas de uma planta FVF analisada diante do somatório de todas as usinas solares de GC do Brasil em operação em 2022. Diante disso, entende-se que com o uso de pouco menos de 50% da área útil a usina FVF é capaz de produzir, anualmente, o equivalente à mesma produção elétrica de usinas FV de GC no Brasil em 2022.

Tabela 8 – Comparação das gerações anuais da usina FVF e de sistemas FV do Brasil.

Cenários	% de Área ocupada (A _{Fvf})	Geração anual FVF (GWh)	% da Geração anual de sistemas FV do Brasil (2022)
1.1	1%	701,84	2,33%
2.1	1%	675,33	2,24%
1.2	5%	3.509,22	11,65%
2.2	5%	3.376,63	11,21%
1.3	10%	7.018,43	23,30%
2.3	10%	6.753,27	22,42%

Fonte: Próprio autor.

5.3 Comparativo com dados do Piauí

Considerando que a represa da UHE em questão está localizada no estado do Piauí e a instalação de uma planta FVF neste local beneficiaria não só esta Unidade Federativa (UF), mas também todas as regiões interligadas ao SIN, entende-se que é pertinente analisar o impacto desta possível geração na produção já existente do Estado e no consumo de energia elétrica deste.

Vale ressaltar que, para fins de otimização dos cálculos e considerando as tendências de crescimento de consumo de energia elétrica em alguns setores observados, além dos dados fornecidos por [59], foram considerados os maiores valores registrados da série histórica de 2013 a 2022.

5.3.1 *Análise considerando o histórico de geração total do Estado*

Na Tabela 9 são apresentados os dados de geração anual, em GWh, das usinas FVF propostas e do Piauí, considerando os dados obtidos no capítulo anterior e no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023 da EPE, respectivamente [59].

Em 2022, o Piauí produziu 14.684,14 GWh de energia elétrica, considerando todas as fontes de geração. Desta forma, ao fazer o confronto entre os dados obtidos no dimensionamento e este valor recorde, observa-se que o percentual de contribuição dos diferentes cenários varia entre 4,60% e 47,80%. Todavia, vale ressaltar que o máximo valor de A_{Fvf} considerado foi de 10% e que se trata apenas de uma planta FVF analisada diante do somatório de toda a produção de energia elétrica do Estado, a qual cresceu 1908,83% em relação a 2013, o que indica o grande desenvolvimento desta UF.

Neste contexto, entende-se que, com a utilização de pouco mais de 20% da área útil, é possível implementar uma usina FVF que produza, anualmente, o equivalente ao que o Estado gerou, considerando todas os tipos de fontes, em 2022. Além disso, qualquer um dos cenários indicados contribui no crescimento do Piauí com relação à GC FV, o qual está em terceiro lugar no ranking brasileiro desta categoria¹, segundo a ABSOLAR [4].

Tabela 9 – Comparação das gerações anuais da usina FVF e do estado do Piauí.

Cenários	% de Área ocupada (A _{fvf})	Geração anual FVF (GWh)	% da Geração anual do Piauí (2022)
1.1	1%	701,84	4,78%
2.1	1%	675,33	4,60%
1.2	5%	3.509,22	23,90%
2.2	5%	3.376,63	23,00%
1.3	10%	7.018,43	47,80%
2.3	10%	6.753,27	45,99%

Fonte: Próprio autor.

5.3.2 Análise considerando o histórico de consumo total do Estado

Na Tabela 10 são apresentados os dados de geração anual, para as usinas FVF propostas, e os números de consumo anual do Piauí, ambos em GWh, considerando os dados obtidos no capítulo anterior e no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023 da EPE, respectivamente [59].

Tabela 10 – Comparação da geração anual da usina FVF e do consumo do Piauí.

Cenários	% de Área ocupada (A _{fvf})	Geração anual FVF (GWh)	% do consumo anual do Piauí (2022)
1.1	1%	701,84	17,56%
2.1	1%	675,33	16,90%
1.2	5%	3.509,22	87,82%
2.2	5%	3.376,63	84,50%
1.3	10%	7.018,43	175,64%
2.3	10%	6.753,27	169,01%

Fonte: Próprio autor.

Em 2022, o Piauí consumiu 3.995,90 GWh de energia elétrica. Desta forma, ao fazer o confronto entre os dados obtidos no dimensionamento e este valor, tem-se que as usinas propostas podem suprir de 16,90% a 175,64% da demanda de eletricidade, a depender do cenário escolhido. Vale ressaltar que o máximo valor de A_{fvf} considerado foi de 10% e que se

¹ Este ranking leva em consideração usinas em construção e outras construções não iniciadas, mas outorgadas.

trata apenas de uma planta FVF analisada diante da necessidade de energia elétrica geral do Estado em questão.

Além disso, é notável que a utilização de, aproximadamente, 8,19 km² de área do corpo d'água disponível já é capaz de suprir quase 90% da demanda de energia elétrica desta UF, o que demonstra o potencial de geração da usina FVF.

5.3.3 *Análise considerando o consumo do Estado em diferentes classes de unidades consumidoras*

Na Tabela 11 são apresentados os dados de geração da usina FVF para os cenários propostos com a finalidade de compará-los com o consumo de grupos de unidades consumidoras (UC) industriais e comerciais do Piauí. Estes foram escolhidos a partir dos dados fornecidos em [59], dentre os quais são objeto de análise aqueles que são expostos abaixo.

Tabela 11 – Comparação entre gerações anuais da usina FVF e consumo em diferentes classes de UCs no Piauí.

Cenários	% de Área ocupada (A _{fvf})	Geração anual FVF (GWh)	% do consumo na Indústria (2014)	% do consumo no Setor Público (2019)	% do consumo para Residências (2022)
1.1	1%	701,84	242,91%	264,58%	35,03%
2.1	1%	675,33	233,74%	254,59%	33,71%
1.2	5%	3.509,22	1214,58%	1322,91%	175,16%
2.2	5%	3.376,63	1168,69%	1272,93%	168,54%
1.3	10%	7.018,43	2429,15%	2645,82%	350,32%
2.3	10%	6.753,27	2337,38%	2545,86%	337,09%

Fonte: Próprio autor.

É de suma importância que o setor industrial de qualquer estado possua garantias do fornecimento da energia elétrica necessária para a produção de produtos que fazem a economia da UF se desenvolver. Neste sentido, considerando a série histórica entre 2013 e 2022, verificou-se que em 2014 o Piauí atingiu o pico de consumo de eletricidade, atingindo o valor de 288,93 GWh. Analisando a Tabela 11 observa-se que a implementação de uma usina FVF que utiliza apenas 1% de A_{fvf} é capaz de suprir mais que o dobro desta demanda do Estado.

É notório que, para o Setor Público, o princípio de economia com alguns gastos sempre é colocado como um dos principais pontos para o desenvolvimento de projetos, além de fatores como o desenvolvimento sustentável. O Ministério Público do Piauí, por exemplo,

segundo [60], adotou um sistema FV que economiza 37,5% da fatura do prédio. Neste Estado, em 2019, a classe de UC em questão consumiu 265,27 GWh. De acordo com a Tabela 11 este valor equivale à menos da metade da produção da usina FVF projetada para o cenário 2.1, a qual utiliza apenas 1% da área útil e módulos FV de 480 Wp. Tal investimento, se realizado, estaria em consonância com projetos que visam a economia e o desenvolvimento sustentável, tal qual o noticiado anteriormente.

Com relação às residências, tem-se que, entre todos os setores da UF em questão, este é o que mais demanda eletricidade. Os diversos fatores, como a crescente no número de trabalhos e aulas virtuais, torna urgente a garantia de fornecimento de eletricidade para as diversas casas do Estado. Em 2022 o consumo residencial no Piauí foi de 2.003,42 GWh. De acordo com a Tabela 11 a planta FVF é capaz de suprir pouco mais de 1/3 deste valor utilizando apenas uma área de 1% de A_{fvf} para ambos os tipos de módulos FV propostos, o que demonstra o potencial da usina em questão.

5.4 Comparativo com dados do Ceará

Considerando que o estudo em questão está sendo feito no Ceará e a instalação de plantas FVFs podem ser implantadas em muitos dos corpos d'água deste Estado, conforme apresentado nos estudos [27] e [29], entende-se que é pertinente analisar o impacto desta possível geração na produção já existente da UF e no consumo de energia elétrica deste.

Vale ressaltar que, para fins de otimização dos cálculos e considerando as tendências de crescimento de consumo de energia elétrica em alguns setores observados, além dos dados fornecidos por [59], foram considerados os maiores valores registrados da série histórica de 2013 a 2022.

5.4.1 Análise considerando o histórico de geração total do Estado

Na Tabela 12 são apresentados os dados de geração anual, em GWh, das usinas FVF propostas e do Ceará, considerando os dados obtidos no capítulo anterior e no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023 da EPE, respectivamente [59].

Em 2021 o Ceará produziu 16.608,82 GWh de energia elétrica, considerando todas as fontes de geração. Desta forma, ao fazer o confronto entre os dados obtidos no dimensionamento e este valor recorde, observa-se que o percentual de contribuição dos diferentes cenários varia entre 4,07% e 42,26%. Todavia, vale ressaltar que o máximo valor de

A_{FVF} considerado foi de 10% e que se trata apenas de uma planta FVF analisada diante do somatório de toda a produção de energia elétrica do Ceará.

Neste contexto, entende-se que, com a utilização de pouco menos de 25% da área útil, é possível implementar uma usina FVF que produza, anualmente, o equivalente ao que o Estado gerou, considerando todas os tipos de fontes, em 2021. Além disso, qualquer um dos cenários indicados contribui no crescimento do Ceará com relação à GC FV, o qual está em quarto lugar no ranking brasileiro desta categoria, segundo a ABSOLAR [4].

Tabela 12 – Comparação das gerações anuais da usina FVF e do Ceará.

Cenários	% de Área ocupada (A_{FVF})	Geração anual FVF (GWh)	% da Geração anual do Ceará (2021)
1.1	1%	701,84	4,23%
2.1	1%	675,33	4,07%
1.2	5%	3.509,22	21,13%
2.2	5%	3.376,63	20,33%
1.3	10%	7.018,43	42,26%
2.3	10%	6.753,27	40,66%

Fonte: Próprio autor.

5.4.2 Análise considerando o histórico de consumo total do Estado

Na Tabela 13 são apresentados os dados de consumo anual, em GWh, das usinas FVF propostas e do Ceará, considerando os dados obtidos no capítulo anterior e no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023 da EPE, respectivamente. [59]

Tabela 13 – Comparação da geração anual da usina FVF e do consumo do Ceará.

Cenários	% de Área ocupada (A_{FVF})	Geração anual FVF (GWh)	% do consumo anual do Ceará (2021)
1.1	1%	701,84	5,32%
2.1	1%	675,33	5,12%
1.2	5%	3.509,22	26,58%
2.2	5%	3.376,63	25,58%
1.3	10%	7.018,43	53,17%
2.3	10%	6.753,27	51,16%

Fonte: Próprio autor.

Em 2021 o Ceará consumiu 13.200,09 GWh de energia elétrica. Desta forma, ao fazer o confronto entre os dados obtidos no dimensionamento e este valor recorde, tem-se que as usinas propostas podem suprir percentuais de energia elétrica de 5,12% a 53,17%, a depender

do cenário escolhido. Vale ressaltar que o máximo valor de A_{fvf} considerado foi de 10% e que se trata apenas de uma planta FVF analisada diante da necessidade elétrica geral do Estado em questão.

Além disso, é notável que a utilização de, aproximadamente, 16,39 km² de área do corpo d'água disponível já é capaz de suprir mais de metade da demanda de energia elétrica desta UF, o que demonstra o potencial de geração da usina FVF.

5.4.3 *Análise considerando o consumo do Estado em diferentes classes de unidades consumidoras*

Na Tabela 14 são apresentados os dados de geração da usina FVF para cenários propostos com a finalidade de compará-los com o consumo de alguns grupos de UCs industriais e comerciais do Ceará. Estes foram escolhidos a partir dos dados fornecidos em [59], dentre os quais são objeto de análise aqueles que são expostos abaixo.

Tabela 14 – Comparação entre gerações anuais da usina FVF e consumo em diferentes classes de UCs no Ceará.

Cenários	% de Área ocupada (A _{fvf})	Geração anual FVF (GWh)	% do consumo na Indústria (2016)	% do consumo no Setor Público (2022)	% do consumo para Residências (2021)
1.1	1%	701,84	26,02%	106,87%	12,74%
2.1	1%	675,33	25,03%	102,83%	12,26%
1.2	5%	3.509,22	130,08%	534,33%	63,70%
2.2	5%	3.376,63	125,16%	514,15%	61,29%
1.3	10%	7.018,43	260,15%	1068,67%	127,39%
2.3	10%	6.753,27	250,32%	1028,29%	122,58%

Fonte: Próprio autor.

É de suma importância que o setor industrial de qualquer estado possua garantias do fornecimento da energia elétrica suficiente para que a produção de produtos e, conseqüentemente, a economia não sejam prejudicadas. Neste sentido, considerando a série histórica entre 2013 e 2022, verificou-se que em 2016 o Ceará atingiu o pico de consumo de eletricidade na indústria, atingindo o valor de 2.697,81 GWh. Analisando a Tabela 14, observa-se que a implementação de uma usina FVF que utiliza apenas 1% de A_{fvf} é capaz de suprir mais de 25% desta demanda do Estado. Assim sendo, o uso de pouco menos de 4% da área útil do

corpo d'água em questão é capaz de garantir uma segurança em termos de energia elétrica à Indústria.

É notório que, para o Setor Público, o princípio de economia com alguns gastos sempre é colocado como um dos principais pontos para o desenvolvimento de projetos. A Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE), por exemplo, segundo [61], busca alternativas, mediante a contratação de energia elétrica no mercado livre, para a redução das faturas referentes a essa questão. Em 2022, esta classe de UC consumiu 656,75 GWh, valor este superado pela geração anual da usina FVF já nos cenários 1.1 e 2.1.

Com relação às residências, tem-se que, entre todos os setores da UF em questão, este é o que mais demanda eletricidade. Os diversos fatores, como a crescente no número de trabalhos e aulas virtuais, torna urgente a garantia de fornecimento de eletricidade para as diversas casas do Estado. Em 2021, o consumo residencial no Ceará foi de 5.509,26 GWh. De acordo com a Tabela 14, a planta FVF é capaz de suprir mais de 60% deste valor utilizando apenas uma área de, aproximadamente, 8,19 km², o que demonstra o potencial de geração da usina FVF.

5.5 Comparativo com dados de consumo comercial e industrial do Nordeste

Na Tabela 15 são apresentados os dados de geração da usina FVF para cenários propostos com a finalidade de compará-los com o consumo em 2022 de alguns setores industriais e comerciais do Nordeste. Estes foram escolhidos levando em consideração o tipo de serviço, identificado pelo número de Classificação Nacional de Atividade Econômica (CNAE), e a posição no ranking de consumo de energia elétrica comercial e industrial da região [59].

Com relação ao consumo observado no ramo comercial, obtiveram-se os dados das empresas que estão englobadas no CNAE 46 – Comércio por atacado, exceto veículos automotores e motocicletas e no CNAE 61 – Telecomunicações. Isto se deu porque o consumo destas duas classes no ano passado foi de 1.253,14 GWh e 705,90 GWh, 2º e 6º lugares no ranking de consumo de energia elétrica para o setor comercial nordestino.

No setor industrial, por sua vez, obtiveram-se os dados do consumo das empresas que estão englobadas no CNAE 22 – Fabricação de produtos de borracha e de material plástico e no CNAE 13 – Fabricação de produtos têxteis. Isto se deu porque o consumo destas duas classes no ano passado foi de 1.624,91 GWh e 1.486,98, 5º e 6º lugares no ranking de consumo de energia elétrica para o setor industrial nordestino.

Desta forma, ao fazer o confronto entre os dados obtidos no dimensionamento e os valores supracitados, tem-se que o percentual de contribuição dos diferentes cenários varia entre 41,56% e 994,25%, conforme apresentado na Tabela 15.

De acordo com o observado, as empresas do comércio de telecomunicações do Nordeste, por exemplo, podem ter seu consumo suprido em 99,42% com o uso de apenas 1% de A_{fvf} e instalação com os módulos de 480 Wp, caso a geração da usina FVF fosse destinada apenas para este fim. Além disso, a construção da planta em questão, com o uso de 1% da área útil e implantação com módulos de 665 Wp, é capaz de suprir mais da metade da demanda energética das empresas do comércio por atacado, exceto veículos automotores e motocicletas.

A fabricação de produtos têxteis é considerada uma atividade industrial muito importante no Nordeste brasileiro, a qual auxilia no emprego de diversas famílias desde que estas empresas foram abertas na região. A usina proposta, sob as condições de uso de 5% de A_{fvf} e instalação com módulos de 480Wp, já consolidados no mercado, é capaz de gerar o equivalente a 236% da necessidade de energia elétrica deste setor. Isto posto, constata-se os benefícios às industriais em questão, trazendo margem para expansão de maquinários e outros favorecimentos não só aos industriais, mas às diversas famílias.

Tabela 15 – Comparação da geração anual da usina FVF e do consumo de setores comerciais e industriais do Nordeste.

Cenários	% de Área ocupada (Afvf)	Geração anual FVF (GWh)	% do consumo CNAE 46	% do consumo CNAE 61	% do consumo CNAE 22	% do consumo CNAE 13
1.1	1%	701,84	56,01%	99,42%	43,19%	47,20%
2.1	1%	675,33	53,89%	95,67%	41,56%	45,42%
1.2	5%	3.509,22	280,03%	497,13%	215,96%	236,00%
2.2	5%	3.376,63	269,45%	478,34%	207,80%	227,08%
1.3	10%	7.018,43	560,07%	994,25%	431,93%	471,99%
2.3	10%	6.753,27	538,91%	956,69%	415,61%	454,16%

Fonte: Próprio autor.

6 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho consiste em propor, mediante o levantamento de dados do ONS, da CHESF, do SIN e da EPE, seis cenários de implementação de plantas FVF no reservatório da UHE de Boa Esperança. Estes são divididos em dois casos diferentes, o primeiro em que a construção da usina se dá com o uso de módulos FV de 480Wp, já consolidados no mercado, e o segundo com módulos de 665Wp, mais recentes no meio comercial brasileiro, o que possibilita uma vida útil maior da usina em termos como manutenção.

A apresentação de diversos artigos desenvolvidos nesta área revela a ausência de estudos aprofundados a respeito desta temática, pois todos deixam margens para diversos estudos posteriores, estimulando o crescimento de pesquisas a respeito deste tipo de sistema FV.

Neste sentido, a metodologia busca apresentar diversos dados de geração da UHE localizada no Estado do Piauí, a qual possui uma capacidade instalada de 237,3 MW, proveniente da associação de turbinas do tipo Francis, sendo duas de 55 MW e duas de 63,65 MW. O reservatório desta usina tem 352,2 km² de área, no entanto, em decorrência dos dados fornecidos pela ANA e associando-os à curva CAV, observa-se que é necessário ter como área base para este estudo 248,30 km². Isto posto, é possível definir os três cenários de cada caso com áreas de 1,64 km², 8,19 km² e 16,39 km², os quais correspondem a 1%, 5% e 10% da área útil do corpo d'água.

Após o dimensionamento deste sistema, e o encontro dos valores equivalentes às capacidades instaladas e gerações anuais de cada cenário, é possível, mediante a comparação com os dados da UHE de Boa Esperança e com os números apresentados pela ABSOLAR e pela EPE nos documentos supracitados, estimar o potencial das usinas FVF propostas.

Isto posto, observa-se que a geração de energia elétrica da usina FVF dos cenários 1.2 e 2.2, os quais correspondem à utilização de uma área de 5% de A_{FVF} , é o triplo da produção elétrica média anual da UHE da CHESF, considerando os valores levantados para os anos de 2012 a 2022. Com relação aos dados a nível nacional, é notório que a usina proposta, utilizando 10% da área útil, é capaz de produzir o equivalente a 1% da geração de energia elétrica brasileira, considerando todas as fontes.

Além disso, a construção dos cenários 1.3 e 2.3, cuja área utilizada corresponde a 10% de A_{FVF} , é capaz de gerar um montante de energia elétrica equivalente a valores em torno de 170% e 51% do consumo anual dos Estados do Piauí e do Ceará, respectivamente,

considerando os anos de máxima demanda para cada um na série histórica de 2013 a 2022. Ademais, a geração elétrica das usinas FVF propostas é capaz de suprir a demanda de diversos ramos industriais da região Nordeste. O cenário 1.1, o que corresponde a 1% de A_{fvf} , por exemplo, cuja geração anual estimada é de 701,84 GWh, é capaz de produzir o equivalente a 56,01%, 99,42%, 43,19% e 47,20% da demanda de energia elétrica das empresas do Nordeste englobadas nos CNAEs 46, 61, 22 e 13, respectivamente.

Por fim, é notório que tais informações atestam o potencial energético deste tipo de construção e o impacto a nível regional, estadual e nacional, podendo suprir diversas necessidades dos mais diferentes contextos, trazendo a possibilidade de contribuição na segurança energética e no desenvolvimento tecnológico-financeiro.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se alguns temas para futuros trabalhos a serem desenvolvidos na mesma linha de pesquisa:

- 1) Estudo do percentual de perdas nos cabos CA e CC para sistemas FVF.
- 2) Estudo de perdas percentuais gerais para os sistemas FVF propostos neste trabalho.
- 3) Estudo para dimensionamento das estruturas de flutuação e ancoragem para as usinas propostas neste trabalho.
- 4) Estudo de complementariedade de geração da UHE de Boa Esperança, a partir de uma usina FVF.
- 5) Estudo de viabilidade da instalação das usinas propostas neste trabalho, levando-se em consideração a disponibilidade na SE CHESF e na rede do SIN.
- 6) Análise de custos para a construção das usinas FVF propostas neste trabalho.
- 7) Dimensionamento do sistema de armazenamento necessário para as usinas FVF propostas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O Sistema em números**. 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- [2] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Histórico da operação**. 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 28 jun. 2023.
- [3] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020.
- [4] ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Infográfico ABSOLAR, 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acessado em: 5 out. 2021.
- [5] SolarPower Europe. **Global Market Outlook: for solar power 2022 - 2026**. For Solar Power 2022 - 2026. 2022. Disponível em: https://api.solarpowereurope.org/uploads/Solar_Power_Europe_Global_Market_Outlook_report_2022_2022_V2_2_87bd2c1e44.pdf. Acesso em: 29 jun. 2023.
- [6] Canal Solar. **Mercado global de energia solar flutuante pode dobrar até 2031**: Wood Mackenzie indica que ao menos 15 países devem ultrapassar 500 mw em instalações nos próximos anos. Wood Mackenzie indica que ao menos 15 países devem ultrapassar 500 MW em instalações nos próximos anos. 2023. Disponível em: https://canalsolar.com.br/mercado-global-de-energia-solar-flutuante-pode-dobrar-ate-2031/?utm_campaign=boletim_diario_29052023&utm_medium=email&utm_source=RD+Station. Acesso em: 29 jun. 2023.
- [7] PV Magazine. **World's largest floating PV plant goes online in China**. 2022. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2022/01/03/worlds-largest-floating-pv-plant-goes-online-in-china/>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- [8] ABSOLAR. **Solar flutuante deverá ter projetos hibridizados a partir de 2024**. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/solar-flutuante-devera-ter-projetos-hibridizados-a-partir-de-2024/>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- [9] World Bank Group, ESMAP and SERIS. 2019. **Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report**. Washington, DC: World Bank.
- [10] IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook 2022**. Paris: IEA, 2022.
- [11] ANEEL. Resolução Normativa N° 482, 17 de Abril de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2012.
- [12] Brasil. Lei n° 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Diário Oficial da União: seção 1. Brasília. DF. p. 4. 07 jan. 2022. PL 5829/2019.

- [13] ANEEL. Resolução Normativa N° 687, 24 de Novembro de 2015. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2015.
- [14] ANEEL. Resolução Normativa N° 786, 27 de Outubro de 2017. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2017.
- [15] ANEEL. Resolução Normativa N° 1059, 07 de Fevereiro de 2023. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2023.
- [16] Sahu, A.; Yadav, N.; Sudhakar, K. **Floating photovoltaic power plant: A review**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 66, 2016, Pages 815-824, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051>.
- [17] Borba, Ricardo A.; Novak, Luis H. **Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes: Aspectos Positivos e Desafios**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/151/151>
- [18] Murphy, C.A.; Schleifer, A.; Eureka, K. **A taxonomy of systems that combine utility-scale renewable energy and energy storage Technologies**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 139, 2021, 110711, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110711>.
- [19] Lee, N. *et al.* **Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential**. *Renewable Energy*, Volume 162, 2020, Pages 1415-1427, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.080>.
- [20] Farfan, J.; Breyer, C. **Combining Floating Solar Photovoltaic Power Plants and Hydropower Reservoirs: A Virtual Battery of Great Global Potential**. *Energy Procedia*, Volume 155, 2018, Pages 403-411, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.038>.
- [21] Exley, G. *et al.* **Floating solar panels on reservoirs impact phytoplankton populations: A modelling experimente**. *Journal of Environmental Management*, Volume 324, 2022, 116410, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116410>.
- [22] Haas, J. *et al.* **Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility, Energy Conversion and Management**. Volume 206, 2020, 112414, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112414>.
- [23] Kakoulaki, G. *et al.* **Benefits of pairing floating solar photovoltaics with hydropower reservoirs in Europe**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 171, 2023, 112989, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112989>.
- [24] Sanchez, Rocio G. *et al.* **Assessment of floating solar photovoltaics potential in existing hydropower reservoirs in Africa**. *Renewable Energy*, Volume 169, 2021, Pages 687-699, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.041>.
- [25] Rauf, H.; Gull, Muhammad S.; Arshad, N. **Integrating Floating Solar PV with Hydroelectric Power Plant: Analysis of Ghazi Barotha Reservoir in Pakistan**. *Energy*

- Procedia, Volume 158, 2019, Pages 816-821, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.214>.
- [26] Ates, Ali M.; Yilmaz, Osman S.; Gulgen, F. **Using remote sensing to calculate floating photovoltaic technical potential of a dam's surface**. Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 41, 2020, 100799, ISSN 2213-1388, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100799>.
- [27] Galdino, Marcos A. E.; Olivieri, Marta M. de A. **Considerações sobre a implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes no Brasil**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1807/1797>
- [28] Lopes, Mariana P. C. *et al.* **Technical potential of floating photovoltaic systems on artificial water bodies in Brazil**. Renewable Energy, Volume 181, 2022, Pages 1023-1033, ISSN 0960 1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.104>
- [29] Lima, Raoni A. de. *et al.* **Impacto da geração de plantas fotovoltaicas flutuantes sobre a matriz energética de estados do semiárido brasileiro**. Revista Brasileira de Energia, Volume 29, Nº 1, 1º Trimestre de 2023, Páginas 106-130. DOI: 10.47168/rbe.v29i1.778
- [30] Moraes, Camile A. *et al.* **Floating photovoltaic plants as an electricity supply option in the Tocantins-Araguaia basin**. Renewable Energy, Volume 193, 2022, Pages 264-277, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.142>.
- [31] Medeiros, Guilherme A. de S.; Ferreira, L. **Utilização de um sistema fotovoltaico flutuante para operação coordenada com usina hidrelétrica e sua viabilidade financeira: Estudo de caso da UHE Sobradinho**. XIV SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2018. Disponível em: <https://thymosenergia.com.br/wp-content/uploads/2019/09/SEPOPE-SP09.pdf>
- [32] Sulaeman, S. *et al.* **Floating PV system as an alternative pathway to the amazon dam underproduction**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 135, 2021, 110082, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110082>
- [33] GOOGLE. **Boa Esperança Hydroelectric Power Plant**. 2023. Disponível em: <https://www.google.com/maps/place/Boa+Esperan%C3%A7a+Hydroelectric+Power+Plant/@-6.7854287,-43.6973871,11z/data=!4m6!3m5!1s0x783f6ac60385c21:0xe247bfcf8e566342!8m2!3d-6.7491409!4d-43.5661091!16s%2Fm%2F04g18x2?entry=ttu>. Acesso em: 29 jun. 2023
- [34] CHESF. **Sistema CHESF: Boa Esperança**. Recife, 2023. Disponível em: <https://www.chesf.com.br/sistemachesf/pages/sistemageracao/boaesperanca.aspx>. Acesso em: 08 set. 2022.
- [35] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Boletim de Julho/2012. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2012. 36 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2012>. Acesso em: 07 set. 2022.

- [36] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Boletim de Outubro/2012. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2012. 36 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2012>. Acesso em: 07 set. 2022.
- [37] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico**: 2013. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2013>. Acesso em: 07 set. 2022.
- [38] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico**: 2014. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2014>. Acesso em: 07 set. 2022.
- [39] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico**: 2015. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2015>. Acesso em: 07 set. 2022.
- [40] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Janeiro - 2016. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2016. 41 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2016/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-janeiro-2016.pdf/view>. Acesso em: 07 set. 2022.
- [41] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Dezembro - 2017. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2017/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-dezembro-2017.pdf/view>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- [42] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Janeiro - 2018. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2018/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-janeiro-2018.pdf/view>. Acesso em: 29 jun. 2023
- [43] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Abril - 2019. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2019/4-boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-abril-2019.pdf/view>. Acesso em: 29 jun. 2023
- [44] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Janeiro - 2019. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2019/1-boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-janeiro-2019.pdf/view>. Acesso em: 29 jun. 2023

eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2019/1-boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-janeiro-2019.pdf/view. Acesso em: 29 de jun.2023

- [45] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Março - 2020. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2020/03-boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-mar-2020.pdf/view>. Acesso em: 29 jun. 2023
- [46] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Janeiro - 2021. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2021/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-jan-2021.pdf/view>. Acesso em: 29 jun. 2023
- [47] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Novembro - 2021. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2021/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-novembro-2021.pdf/view>. Acesso em: 29 jun. 2023
- [48] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Janeiro - 2022. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2022/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-janeiro-2022_dmse.pdf/view. Acesso em: 29 jun. 2023
- [49] ZAMBON, R. C. A operação dos reservatórios e o planejamento da operação hidrotérmica do Sistema Interligado Nacional. **Revista USP**, [S. l.], n. 104, p. 133-144, 2015. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i104p133-144. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/106762>. Acesso em: 7 set. 2022.
- [50] BORGES, F. Q. CRISE DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL - UMA BREVE REFLEXÃO SOBRE A DINÂMICA DE SUAS ORIGENS E RESULTADOS. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar** - ISSN 2675-6218, [S. l.], v. 2, n. 10, p. e210809, 2021. DOI: 10.47820/recima21.v2i10.809. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/809>. Acesso em: 7 set. 2022.
- [51] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Boletim de Setembro/2016. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2016. 36 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2016>. Acesso em: 07 set. 2022.
- [52] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Boletim de Julho/2012. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2012. 36 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2012>

- eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2012. Acesso em: 07 set. 2022.
- [53] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico**: 2016. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2016>. Acesso em: 07 set. 2022.
- [54] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin?dropDownListEstados=19&dropDownListReservatorios=19127&dataInicial=01%2F01%2F2012&dataFinal=31%2F12%2F2022&button=Buscar>. Acesso em: 02 jun. 2023.
- [55] G1. **Barragem de Boa Esperança atinge 68,3% de seu volume total, diz Chesf**. 2016. Disponível em: <https://g1.globo.com/pi/piaui/noticia/2016/02/barragem-de-boa-esperanca-atinge-683-de-seu-volume-total-diz-chesf.html>. Acesso em: 02 jun. 2023.
- [56] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Catálogo de Metadados da ANA**. Cota x Área x Volume dos Reservatórios de Usinas Hidrelétricas. 2020. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b8f0487a-df73-4f8d-8b22-bb49cf9f3683>. Acesso em: 02 jun. 2023.
- [57] STRANGUETO, k. **Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Energia Elétrica através de Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes em Reservatórios de Hidrelétricas**. Tese (Planejamento de Sistemas Energéticos) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. 147 f.
- [58] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **GERAÇÃO E FATOR DE CAPACIDADE MÉDIOS MENSAIS**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-fator-capacidade-medios-mensais.aspx>. Acesso em: 02 jun. 2023.
- [59] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **2023 STATISTICAL YEARBOOK OF ELECTRICITY: 2022 baseline year**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro-eng/#Presentation>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- [60] PIAUÍ. Ministério Público do Estado do Piauí. **Energia solar fotovoltaica é adotada em sede Centro do MPPI**. 2022. Disponível em: <https://www.mppi.mp.br/internet/2022/11/energia-solar-fotovoltaica-e-adotada-em-sede-centro-do-mppi/>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- [61] CEARÁ. Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará. **SEINFRA realiza licitação para compra de energia no mercado livre**. 2022. Disponível em: <https://www.seinfra.ce.gov.br/2022/12/31/seinfra-realiza-licitacao-para-compra-de-energia-no-mercado-livre/>. Acesso em: 29 jun. 2023.

ANEXO A – DATASHEET DO MÓDULO DE 480 Wp

www.jinkosolar.com



Tiger Neo N-type 60HL4-(V) 460-480 Watt

Módulo Monofacial

N-Type

Tolerância de potência positiva de 0~+ 3%

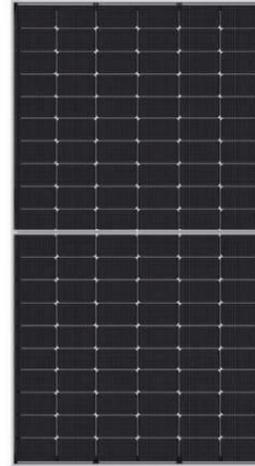
IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Sistema de Gestão da Qualidade

ISO14001:2015: Sistema de Gestão Ambiental

ISO45001:2018

Sistemas de gestão de saúde e segurança ocupacional



Características Principais



Tecnologia Multi Busbar

Melhor captura de luz e coleta de corrente para melhorar a confiabilidade e a saída de energia do módulo.



Resistência PID

Excelente garantia de desempenho Anti-PID através de processo de produção em massa otimizado e controle de materiais.



Durabilidade contra condições ambientais extremas

Alta resistência à névoa de sal e amônia.



Perda de ponto 2.0 quente reduzida

O módulo tipo N com tecnologia Hot 2.0 tem melhor confiabilidade e menor LID / LETID

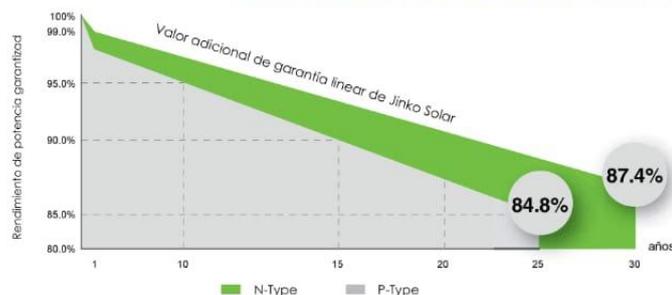


Economia no custo de BOS

Projetado para sistemas de alta tensão de até 1500 VDC, economizando em custo de BOS.



GARANTIA DE DESEMPENHO LINEAR

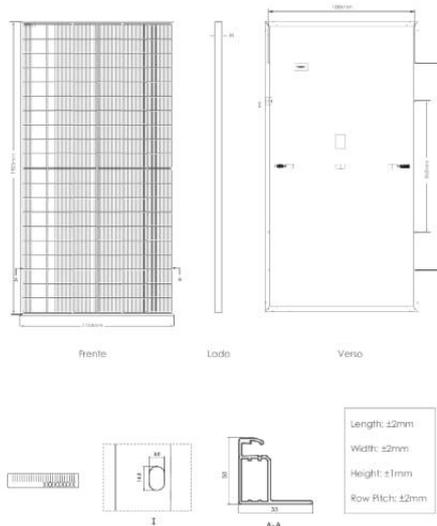


Garantia de produto de **12** anos

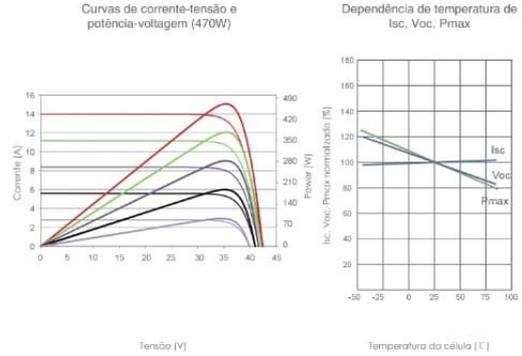
Garantia de energia linear de **30** anos

0,4% de degradação anual em 25 anos

Desenhos de engenharia



Desempenho elétrico e dependência de temperatura



Características mecânicas

Tipo de célula	N type Mono-crystalline
Nº de células	120 (6×20)
Dimensões	1903×1134×30mm (74,92×44,65×1,18 inch)
Peso	24,2 kg (53,35 lbs)
Vidro frontal	3,2 mm, revestimento anti-reflexo, alta transmissão, baixo teor de ferro, vidro temperado
Quadro	Liga de Alumínio Anodizado
Caixa de Junção	Classificação IP68
Cabos de saída	TUV 1 × 4,0 mm² {+};400mm, {-};200mm ou comprimento personalizado

Configuração de embalagem

(Dois paletes = uma pilina)
36pcs/ palete, 72 pcs/pilha, 864 pcs/container de 40'HQ

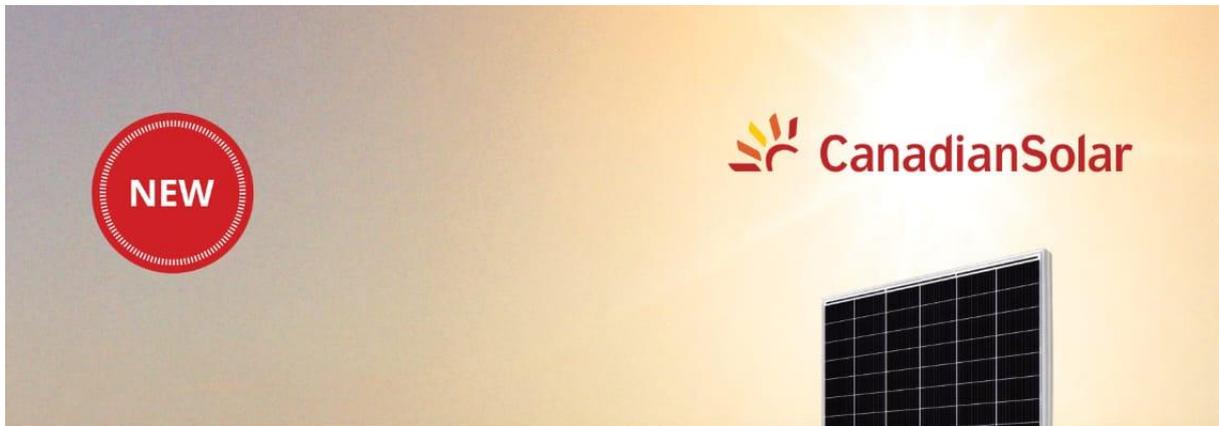
ESPECIFICAÇÕES

Tipo de Módulo	JKM460N-60HL4		JKM465N-60HL4		JKM470N-60HL4		JKM475N-60HL4		JKM480N-60HL4	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Potência máxima (Pmax)	460Wp	346Wp	465Wp	350Wp	470Wp	353Wp	475Wp	357Wp	480Wp	361Wp
Tensão máxima de energia (Vmp)	34,72V	33,60V	34,89V	32,77V	35,05V	32,94V	35,21V	33,10V	35,38V	33,27V
Corrente de potência máxima (Imp)	13,25A	10,61A	13,33A	10,67A	13,41A	10,73A	13,49A	10,79A	13,57A	10,85A
Tensão de circuito aberto (Voc)	42,05V	39,94V	42,22V	40,10V	42,38V	40,25V	42,54V	40,41V	42,71V	40,57V
Corrente de curto-circuito (Isc)	13,99A	11,29A	14,07A	11,36A	14,15A	11,42A	14,23A	11,49A	14,31A	11,55A
Eficiência do Módulo STC (%)	21,32%		21,55%		21,78%		22,01%		22,24%	
Temperatura de operação (°C)	-40°C~+85°C									
Tensão máxima do sistema	1000/1500VDC (IEC)									
Classificação máxima do fusível em série	25A									
Tolerância de potência	0~+3%									
Coefficientes de temperatura de Pmax	-0,30%/°C									
Coefficientes de temperatura de Voc	-0,25%/°C									
Coefficientes de temperatura de Isc	0,046%/°C									
Temperatura nominal da célula operacional (NOCT)	45±2°C									

*STC: ☀ Irradiance 1000W/m² 🌡 Temperatura da célula 25 °C ☁ AM=1,5
 NOCT: ☀ Irradiance 800W/m² 🌡 Temperatura ambiente 20 °C ☁ AM=1,5 🌀 Velocidade do vento 1m/s

©2021 Jinko Solar Co., Ltd. Todos os direitos reservados.
 As especificações incluídas nesta folha de dados estão sujeitas a alterações sem aviso prévio. JKM460-480N-60HL4(-V)-F1-PT (IEC 2016)

ANEXO B – DATASHEET DO MÓDULO DE 665 Wp



HiKu7 Mono PERC

640 W ~ 670 W

CS7N-640 | 645 | 650 | 655 | 660 | 665 | 670MS

MORE POWER



Module power up to 670 W
Module efficiency up to 21.6 %



Up to 3.5 % lower LCOE
Up to 5.7 % lower system cost



Comprehensive LID / LeTID mitigation
technology, up to 50% lower degradation



Better shading tolerance

MORE RELIABLE



40 °C lower hot spot temperature,
greatly reduce module failure rate



Minimizes micro-crack impacts



Heavy snow load up to 5400 Pa,
wind load up to 2400 Pa*



**Enhanced Product Warranty on Materials
and Workmanship***



Linear Power Performance Warranty*

**1st year power degradation no more than 2%
Subsequent annual power degradation no more than 0.55%**

*According to the applicable Canadian Solar Limited Warranty Statement.

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001:2015 / Quality management system
ISO 14001:2015 / Standards for environmental management system
ISO 45001: 2018 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730 / CE / INMETRO / MCS / UKCA
UL 61730 / IEC 61701 / IEC 62716 / IEC 60068-2-68
UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1 / Take-e-way



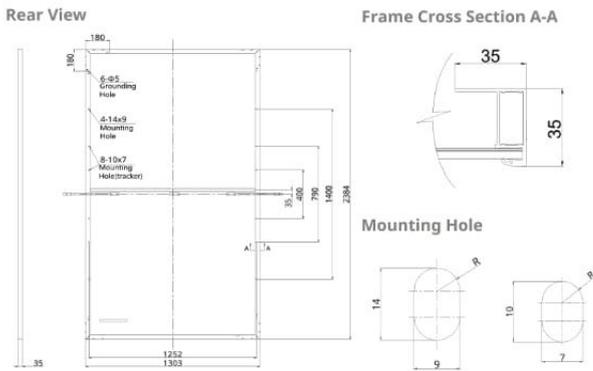
* The specific certificates applicable to different module types and markets will vary, and therefore not all of the certifications listed herein will simultaneously apply to the products you order or use. Please contact your local Canadian Solar sales representative to confirm the specific certificates available for your Product and applicable in the regions in which the products will be used.

CSI Solar Co., Ltd. is committed to providing high quality solar photovoltaic modules, solar energy and battery storage solutions to customers. The company was recognized as the No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in the IHS Module Customer Insight Survey. Over the past 20 years, it has successfully delivered over 70 GW of premium-quality solar modules across the world.

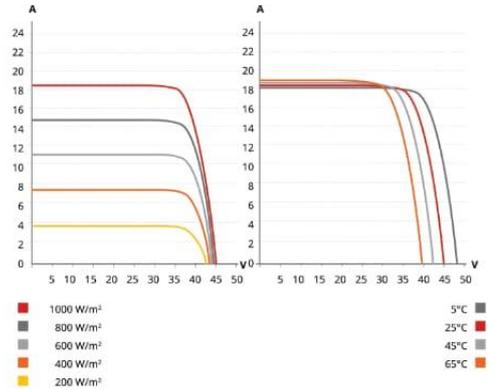
* For detailed information, please refer to the Installation Manual.

CSI Solar Co., Ltd.
199 Lushan Road, SND, Suzhou, Jiangsu, China, 215129, www.csisolar.com, support@csisolar.com

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS7N-650MS / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS7N	640MS	645MS	650MS	655MS	660MS	665MS	670MS
Nominal Max. Power (Pmax)	640 W	645 W	650 W	655 W	660 W	665 W	670 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.5 V	37.7 V	37.9 V	38.1 V	38.3 V	38.5 V	38.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	17.07 A	17.11 A	17.16 A	17.20 A	17.24 A	17.28 A	17.32 A
Open Circuit Voltage (Voc)	44.6 V	44.8 V	45.0 V	45.2 V	45.4 V	45.6 V	45.8 V
Short Circuit Current (Isc)	18.31 A	18.35 A	18.39 A	18.43 A	18.47 A	18.51 A	18.55 A
Module Efficiency	20.6%	20.8%	20.9%	21.1%	21.2%	21.4%	21.6%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C						
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)						
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 61730 1500V) or TYPE 2 (UL 61730 1000V) or CLASS C (IEC 61730)						
Max. Series Fuse Rating	30 A						
Application Classification	Class A						
Power Tolerance	0 ~ + 10 W						

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS7N	640MS	645MS	650MS	655MS	660MS	665MS	670MS
Nominal Max. Power (Pmax)	480 W	484 W	487 W	491 W	495 W	499 W	502 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	35.2 V	35.3 V	35.5 V	35.7 V	35.9 V	36.1 V	36.3 V
Opt. Operating Current (Imp)	13.64 A	13.72 A	13.74 A	13.76 A	13.79 A	13.83 A	13.85 A
Open Circuit Voltage (Voc)	42.2 V	42.3 V	42.5 V	42.7 V	42.9 V	43.1 V	43.3 V
Short Circuit Current (Isc)	14.77 A	14.80 A	14.83 A	14.86 A	14.89 A	14.93 A	14.96 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m²; spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline
Cell Arrangement	132 [2 x (11 x 6)]
Dimensions	2384 x 1303 x 35 mm (93.9 x 51.3 x 1.38 in)
Weight	34.4 kg (75.8 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass with anti-reflective coating
Frame	Anodized aluminium alloy, crossbar enhanced
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4 mm² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	460 mm (18.1 in) (+) / 340 mm (13.4 in) (-) or customized length*
Connector	T6 or T4 series or MC4-EVO2
Per Pallet	31 pieces
Per Container (40' HQ)	527 pieces

* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.34 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.26 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	41 ± 3°C

PARTNER SECTION



* The specifications and key features contained in this datasheet may deviate slightly from our actual products due to the on-going innovation and product enhancement. CSI Solar Co., Ltd. reserves the right to make necessary adjustment to the information described herein at any time without further notice. Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

CSI Solar Co., Ltd.
199 Lushan Road, SND, Suzhou, Jiangsu, China, 215129, www.csisolar.com, support@csisolar.com