

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA/DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RAFAEL OLIVEIRA LOBATO

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA E DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM CÂMPUS DO INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS

Goiânia, 2022.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Rafael Oliveira Lobato

Matrícula: 20202011060024

Título do Trabalho: Análise da geração de energia e dos índices de mérito de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em câmpus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
 2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
 3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).
- Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 10 de março de 2022.

Rafael Oliveira Lobato

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA/ DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RAFAEL OLIVEIRA LOBATO

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA E DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM CÂMPUS DO INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Elétrica como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Domingos

Goiânia, 2022.

L781a Lobato, Rafael Oliveira.

Análise da geração de energia e dos índices de mérito de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás / Rafael Oliveira Lobato. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2022.

42 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Domingos.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Sistema fotovoltaico. 2. Energia solar. I. Domingos, José Luis (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 621.47

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

RAFAEL OLIVEIRA LOBATO

**ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA E DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM CÂMPUS DO INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Goiânia, 08 de fevereiro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Luis Domingos
Orientador - IFG/Câmpus Goiânia

Prof. Dr. Carlos Roberto da Silveira Júnior
Membro da Banca Examinadora - IFG/Câmpus Goiânia

Prof. Me. Paulo César Bezerra Bastos
Membro da Banca Examinadora - IFG/Câmpus Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- Paulo Cesar Bezerra Bastos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/03/2022 18:23:35.
- Carlos Roberto da Silveira Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/03/2022 18:07:47.
- Jose Luis Domingos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/03/2022 18:05:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/03/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 256172
Código de Autenticação: 32fec803d2



EPÍGRAFE

“A paciência é uma árvore de raízes amargas, mas de frutos muito doces.”

(Provérbio oriental)

TÍTULO: ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA E DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM CÂMPUS DO INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS

Autor: Rafael Oliveira Lobato

Orientador: Dr. José Luis Domingos

RESUMO

A energia solar é uma tecnologia renovável, sustentável e com alto potencial para captação, conversão e geração de energia elétrica. Essas características favorecem os investimentos a essa tecnologia, de modo que torna-se necessário compreender os desafios que atualmente envolvem a energia solar, como as limitações de performance. Assim, neste trabalho, são desenvolvidas análises de geração de energia elétrica e dos índices de mérito de Sistemas Fotovoltaicos (SFV) instalados em Câmpus do IFG com intuito de avaliar o sistema com melhor desempenho e os fatores que proporcionam essa melhor performance. Primeiramente, é realizado o Estudo de Caso I, no qual compara-se o desempenho de duas *strings*, uma com arrefecimento e outra sem arrefecimento, pertencentes a um SFV em planta piloto instalado em solo no Câmpus Aparecida de Goiânia. Neste estudo, verifica-se também a credibilidade do procedimento de cálculo adotado para obter os índices de mérito Fator de Capacidade (FC), Produtividade do Sistema (Y_F), Produtividade de Referência (Y_R) e Desempenho Global (PR) por meio da comparação dos resultados com a literatura acadêmica. Posteriormente, é realizado o Estudo de Caso II, em que compara-se o desempenho de três SFV do Câmpus Goiânia e um do Câmpus Itumbiara por meio da aplicação dos cálculos dos índices de mérito utilizados no Estudo de Caso I. Neste estudo, realiza-se também a análise da geração de energia elétrica. Os resultados do Estudo de Caso I apontam que a *string* com arrefecimento apresenta desempenho sutilmente superior a *string* sem arrefecimento e os resultados do Estudo de Caso II indicam que o melhor desempenho é verificado em um SFV submetido a um serviço de limpeza especializada em seus painéis fotovoltaicos.

Palavras-chave: Índices de Mérito. Sistema Fotovoltaico. Energia Solar.

TITLE: ANALYSIS OF ENERGY GENERATION AND MERIT INDEXES OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN CAMPUS OF THE FEDERAL INSTITUTE OF EDUCATION, SCIENCE AND TECHNOLOGY OF GOIÁS

Author: Rafael Oliveira Lobato

Adviser: Dr. José Luis Domingos

ABSTRACT

Solar energy is Solar energy is a technology renewable, sustainable and with high potential for capturing, converting and generating electricity. These characteristics favor investments in this technology, so that is necessary to understand the challenges that currently involve solar energy, such as performance limitations. Thus, in this work, are developed analyzes of electricity generation and merit indices of Photovoltaic Systems (SFV) installed in IFG Campus in order to evaluate the system with the best performance and the factors that provide this best performance. Firstly, is carried out Case Study I, in which is compared the performance of two strings, one with cooling and the other without cooling, belonging to a SFV in a pilot plant installed on the ground in the Aparecida de Goiânia Campus. In this study, is also verified the credibility of the calculation procedure adopted to obtain the merit indices Capacity Factor (FC), Final Yield (YF), Reference Yield (YR) and Performance Ratio (PR) by through comparing results with the academic literature. Subsequently, is carried out Case Study II in which the performance of three SFVs from the Goiânia Campus and one from the Itumbiara Campus is compared by through the application of the merit index calculations used in Case Study I. In this study, is also carried out the analysis of the generation of electric energy. The results of Case Study I indicate that the string with cooling has a subtly superior performance to the string without cooling and the results of Case Study II indicate that the best performance is verified in an SFV submitted to a specialized cleaning service in its photovoltaic panels.

Keywords: Merit Index. Photovoltaic System. Solar Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Principais ângulos em energia solar fotovoltaica.....	8
Figura 3.1: Fluxograma do procedimento metodológico.	11
Figura 4.1: Vista aérea da microusina solar fotovoltaica do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG.....	15
Figura 4.2: Vista aérea dos painéis da planta piloto instalada em solo do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG.	16
Figura 4.3: Vista lateral da planta piloto instalada em solo do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG.....	16
Figura 4.4: Calha de coleta da água de arrefecimento da <i>string</i> superior da planta piloto do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG.....	16
Figura 4.5: Perfis de alumínio para arrefecimento da <i>string</i> superior da planta piloto do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG.....	16
Figura 4.6: Vista aérea da usina solar fotovoltaica do Câmpus Goiânia do IFG..	23
Figura 4.7: Inversor 5 e 6 do Câmpus Goiânia do IFG.	24
Figura 4.8: Inversor 7 do Câmpus Goiânia do IFG.	24
Figura 4.9: Vista aérea da usina solar do Câmpus Itumbiara do IFG.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Resumo da geração de energia e dos índices de mérito dos sistemas fotovoltaicos do IFG.....	36
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Geração diária de energia elétrica do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG (2021).	18
Gráfico 4.2: Fator de Capacidade das <i>strings</i> em planta-piloto do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG (2021).	19
Gráfico 4.3: Produtividade do Sistema das <i>strings</i> em planta-piloto do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG (2021).	20
Gráfico 4.4: Desempenho Global das <i>strings</i> em planta-piloto do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG (2021).	21
Gráfico 4.5: Geração mensal de energia elétrica dos Câmpus Goiânia e Itumbiara do IFG (2021).	26
Gráfico 4.6: Geração diária de energia elétrica dos Câmpus Goiânia e Itumbiara do IFG (2021).	28
Gráfico 4.7: Comparação entre a geração diária de energia elétrica do Câmpus Goiânia com dados meteorológicos local (2021).	29
Gráfico 4.8: Comparação entre a média diária de geração de energia elétrica do SFV 7 com e sem sujidade somente no mês de agosto (2021).	31
Gráfico 4.9: Comparação entre a média diária de geração de energia elétrica do SFV 7 com e sem sujidade (2021).	31
Gráfico 4.10: Fator de Capacidade dos SFV 5, 6, 7 e B400 do IFG (2021).	33
Gráfico 4.11: Produtividade do Sistema dos SFV 5, 6, 7 e B400 do IFG (2021).	34
Gráfico 4.12: Desempenho Global dos SFV 5, 6, 7 e B400 do IFG (2021).	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COP26	26° Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
FC	Fator de Capacidade
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LABREN	Laboratório de Modelagem de Recursos Renováveis de Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
PR	Desempenho Global
REN21	<i>Renewable Now 21</i>
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFV	Sistema Fotovoltaico
STC	<i>Standart Test Conditions</i>
Y_F	Produtividade do Sistema
Y_R	Produtividade de Referência

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	3
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2	CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	ÍNDICES DE MÉRITO	5
2.2	FATOR DE CAPACIDADE	6
2.3	ÍNDICES DE PRODUTIVIDADE	6
2.3.1	PRODUTIVIDADE DO SISTEMA	7
2.3.2	PRODUTIVIDADE DE REFERÊNCIA	7
2.3.2.1	Irradiação e irradiância	7
2.4	DESEMPENHO GLOBAL	9
2.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO	10
3	CAPÍTULO III – METODOLOGIA	11
3.1	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	11
3.1.1	LEVANTAMENTO DE DADOS	12
3.1.2	PROCESSAMENTO DE DADOS	13
3.1.3	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	13
3.2	SÍNTESE DO CAPÍTULO	13
4	CAPÍTULO IV – RESULTADOS	14
4.1	ESTUDO DE CASO I: ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA E DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE UMA PLANTA PILOTO	14
4.1.1	LEVANTAMENTO DE DADOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	14
4.1.2	RESULTADOS E COMPARAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ENTRE AS STRINGS COM E SEM ARREFECIMENTO	17

4.1.3	RESULTADOS E COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE MÉRITO ENTRE AS STRINGS COM E SEM ARREFECIMENTO.....	19
4.2	ESTUDO DE CASO II: ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA E DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE QUATRO SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	22
4.2.1	LEVANTAMENTO DE DADOS DOS QUATRO SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	23
4.2.2	RESULTADOS E COMPARAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ENTRE OS QUATRO SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	25
4.2.2.1	Análise sobre o comportamento diário da geração de energia elétrica.....	27
4.2.3	RESULTADOS E COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE MÉRITO ENTRE OS QUATRO SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	33
4.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	36
5	CAPÍTULO V – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
5.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	38
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

1 CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

O Sol é uma fonte permanente e inesgotável de energia. A irradiação constante dessa estrela na Terra proporciona ambientes com climas habitáveis, presença de água em estado líquido e torna possível a existência da vida, fornecendo abundância energética para os seres fotossintetizantes, na base da cadeia alimentar, possam desenvolver-se e manter o ciclo da vida (SILVA, 2019). Da mesma forma, é possível, através de receptores fotovoltaicos captar, transformar e gerar energia elétrica para alimentar diversos dispositivos, equipamentos e maquinários essenciais para o cotidiano da humanidade (ABNT, 2013).

A incidência de luz solar ocorre em todo o planeta, oscilando a intensidade de acordo com a latitude, clima e estação do ano de determinada localidade, o que garante vasta extensão territorial para a captação dessa energia e conversão para eletricidade (LUCIANO, 2015). A liberdade geográfica para produzir energia elétrica através da energia solar é consolidada através da característica descentralizada e autônoma dos equipamentos fotovoltaicos, os quais podem ou não estarem conectados à rede elétrica de uma concessionária, ou seja, podem ser *on-grid* ou *off-grid* (PINHO e GALDINO, 2014).

Outro fator que torna os equipamentos fotovoltaicos versáteis e adequados para qualquer localidade é a flexibilidade com os quais podem ser produzidos. Estes podem ser fabricados em diversos tamanhos e geometrias, possibilitando a existência de dispositivos fotovoltaicos portáteis ou destinados para implantação de usinas, bem como a adaptação desses equipamentos em arranjos personalizados.

A ausência de emissão de gases poluentes, os reduzidos impactos ambientais e a captação de um recurso natural permanente de energia caracterizam os equipamentos fotovoltaicos como provedores uma energia renovável e sustentável, que é a energia solar. Com exceção da energia geotérmica, todas as demais fontes de energia renováveis, como a hídrica, biomassa e eólica beneficiam-se diretamente ou indiretamente da energia proveniente do Sol, tornando-o uma fonte de energia essencial.

O Sol incide anualmente cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh na atmosfera terrestre (CRESESB, 2008). Esse valor demonstra o potencial a ser explorado por essa fonte energética, uma vez que em 2020 a capacidade mundial de produção de energia solar foi de 760 GW (REN21, 2021) e não corresponde a 03% da matriz energética mundial (EPE, 2021).

O Brasil destaca-se no mercado global de energias renováveis. Em 2020 o país alcançou a terceira posição no grupo dos países com maior capacidade de geração de energia limpa e sustentável. Nas demais comparações mundiais, ocupou a segunda posição em relação as fontes hídricas, a terceira posição em relação as fontes de biomassa, a oitava posição em relação a fonte eólica e a décima sexta posição em relação a energia solar (ABSOLAR, 2021).

O país encontra-se geograficamente nas regiões equatorial e tropical, o que favorece a eficiência dos equipamentos fotovoltaicos e o investimento em usinas solares. Em 2021, apenas 2,4% da matriz elétrica nacional consistia nessa tecnologia de produção de energia elétrica (ABSOLAR, 2022). O Brasil, de acordo com a participação na 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP26) comprometeu-se com a redução de 50% das emissões de carbono até 2030 (Brasil. MMA, 2021). A energia solar encontra-se como uma solução viável para essa meta, com estimativa que até 2025 alcance 4,8% da produção nacional de energia elétrica (ONS, 2022).

O Marco Legal da Energia Solar, sancionado em 07 de janeiro de 2022, visa transparecer as condutas e leis sobre essa tecnologia, o que permite segurança jurídica e incentiva o investimento de adeptos da energia solar (Brasil, MME; D.O.U, 2022). A publicação da Resolução Normativa Aneel nº 954, em 30 de novembro de 2021, estabelece tratamento regulatório para a implantação de Centrais Geradoras Híbridas (UGH)¹ e centrais geradoras associadas², o que favorece a ampliação da energia solar na matriz energética nacional (Brasil, D.O.U, 2021).

Diante dos avanços da tecnologia em território nacional, é necessário compreender os desafios que atualmente envolvem a energia solar. Fatores como performance limitada, atuação operacional restrita a presença do Sol e perdas de energia no processo de geração são alguns dos problemas enfrentados, sobretudo, nos sistemas fotovoltaicos de usinas solares conectados à rede.

¹ Centrais Geradoras Híbridas (UGH): instalação de produção de energia elétrica a partir da combinação de diferentes tecnologias de geração, com medições distintas por tecnologia de geração ou não, objeto de outorga única.

² Centrais Geradoras Associadas: duas ou mais instalações, com a finalidade de produção de energia elétrica com diferentes tecnologias de geração, com outorgas e medições distintas, que compartilham fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão e uso do sistema de transmissão.

A realização deste trabalho acadêmico justifica-se pela necessidade de avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos em diferentes situações e localidades e determinar qual configuração fornece a melhor performance tendo como referência os índices de mérito aplicados. A importância desse tipo de pesquisa deve-se a ascensão dessa tecnologia e reflete em sugestões para os modos de instalação dos equipamentos solares, o tipo de manutenção a ser adotada, a taxa de rentabilidade, o fluxo de energia na rede elétrica, as configurações com maior produtividade e geração de energia elétrica.

A escolha de sistemas fotovoltaicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) deve-se a instalação de usinas solares projetadas para a viabilização de pesquisas e haver sistemas com o início de atuação operacional recente (2021), o que possibilita a coleta de dados e geração de informações pioneiras sobre o desempenho dos mesmos. Evidencia-se que as usinas solares do IFG estão sujeitas a condições meteorológicas, sujidade, intervenções de manutenção, sombreamentos, com presença ou não de monitoramento remoto.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar e comparar o desempenho de sistemas fotovoltaicos instalados em Câmpus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) por meio da geração de energia solar e dos índices de mérito.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- apresentar o estado da arte e a fundamentação teórica sobre a análise de índices de mérito de sistemas fotovoltaicos;
- realizar o levantamento de dados de localização, clima, meteorologia, potência instalada e geração de energia elétrica de cinco sistemas fotovoltaicos para a realização da análise e comparação de desempenho;
- analisar os dados de geração de energia elétrica utilizados para a aquisição dos índices de mérito;
- avaliar o procedimento de cálculo utilizado para obter os índices de mérito a partir do estudo de caso de uma planta piloto (estudo de caso I);

- aplicar o procedimento avaliado e aprovado (estudo de caso I) em outros quatro sistemas fotovoltaicos (estudo de caso II);
- determinar os sistemas fotovoltaicos com melhores performances e avaliar as condições que favoreceram esses desempenhos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, com a seguinte descrição:

- Capítulo I: apresenta as premissas do trabalho, com a breve exposição do estado da arte envolvendo a energia solar, a importância da análise do desempenho dos sistemas fotovoltaicos e os objetivos geral e específicos;
- Capítulo II: descreve a fundamentação teórica, os conceitos e o estado da arte de cada índice de mérito adotado neste trabalho, bem como os elementos necessários para alcançar esses parâmetros;
- Capítulo III: descreve a metodologia utilizada para alcançar os resultados da pesquisa. Apresenta a origem dos dados coletados, os cálculos realizados e os critérios adotados para a análise quantitativa e gráfica dos resultados obtidos;
- Capítulo IV: apresenta os resultados alcançados nos estudos de caso I e II. O primeiro estudo de caso avalia o procedimento de cálculo desenvolvido para obter os índices de mérito por meio da análise e comparação de duas *strings* com e sem arrefecimento de um sistema fotovoltaico do IFG. Compara-se também os dados de geração de energia elétrica com os de outro trabalho acadêmico sobre o mesmo sistema. O segundo estudo de caso é destinado a aplicação do método aprovado para analisar e comparar quatro sistemas fotovoltaicos instalados no IFG;
- Capítulo V: apresenta a conclusão deste trabalho e as sugestões para estudos futuros.

2 CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo descreve a fundamentação teórica, os conceitos e o estado da arte a respeito dos índices de mérito em sistemas fotovoltaicos com base em normas nacionais, internacionais e literatura acadêmica. Os índices de mérito abordados são o Fator de Capacidade (FC), Produtividade do Sistema (Y_F), Produtividade de Referência (Y_R) e Desempenho Global (PR). A irradiação, a potência instalada e dados de geração de energia elétrica são elementos essenciais para atingir esses índices de mérito.

2.1 ÍNDICES DE MÉRITO

Os índices de mérito, também denominados como figuras de mérito, índices de desempenho ou índices de mensuração são indicadores de performance que relacionam um determinado sistema com uma referência estabelecida. Em energia solar, os índices de mérito de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFVCR) são avaliados tomando como referência os parâmetros estabelecidos pela *International Energy Agency (IEA)*, os quais encontram-se descritos na norma *International Electrotechnical Commission (IEC) 61724* (IEC, 1998).

Segundo Adaramola e Vagnes (2015) e Mello (2016), esses índices de desempenho fornecem uma base sobre a qual distintos sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser comparados independentemente da localidade, configuração, design, tecnologia ou condição operacional. De acordo com Marion *et al.* (2005) esses indicadores ainda permitem a detecção de problemas operacionais, portanto, também são utilizados com a finalidade de monitorar os sistemas fotovoltaicos e sinalizar quando é necessário a realização de ajustes e manutenção.

Na literatura acadêmica, o estado da arte dos índices de mensuração aponta que os indicadores mais utilizados são: fator de capacidade, produtividade de referência, produtividade final e desempenho global (SILVA *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2017; SGANZERLA, 2018; KRASNIAK *et al.*, 2018; MACHADO *et al.*, 2020; YANG, 2020; KROTH, 2021).

2.2 FATOR DE CAPACIDADE

O Fator de Capacidade (*FC*), originalmente do inglês Capacity Factor, de um sistema fotovoltaico é um indicador de desempenho determinado pela razão entre a energia elétrica efetivamente gerada e a energia elétrica produzida caso o sistema operasse em potência nominal durante todo o período analisado, em condição padrão (STD - Irradiância de 1.000 W/m², temperatura de célula de 25° C e distribuição espectral AM 1,5) (IEC, 1998; RAMPINELLI, 2010; SILVA *et al.*, 2016).

Deste modo, o *FC* é obtido por meio da expressão matemática:

$$FC = \frac{E_{ca}}{E_{std}} = \frac{\int_0^T P_{ca}(t) \cdot dt}{\int_0^T P_{std}(t) \cdot dt}, \quad (2.2)$$

em que:

T - Período de operação;

E_{ca} - Energia entregue à rede;

E_{std} - Energia que seria entregue se o sistema operasse todo o período analisado em condições padrão (STD);

P_{ca} - Potência entregue à rede elétrica;

P_{std} - Potência instalada do sistema em condições padrão (STD).

O *FC* é utilizado em diferentes tipos de produção de energia, possibilitando comparações entre diferentes formas de conversão de energia elétrica, dado em porcentagem. Devido à natureza intermitente do recurso solar, presente de modo limitado, o fator de capacidade dos sistemas fotovoltaicos é baixo (MELLO, 2016). No Brasil, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede apresentam o fator de capacidade entre 13 e 18% a depender das variações do sistema (BENEDITO, 2009).

2.3 ÍNDICES DE PRODUTIVIDADE

Os índices de produtividade são indicadores de rendimento dos sistemas fotovoltaicos. Neste trabalho, são apresentados dois desses índices.

2.3.1 Produtividade do Sistema

O índice de Produtividade do Sistema (Y_F), do inglês *Final Yield*, é definido como a razão entre a energia elétrica produzida em corrente alternada injetada na rede (kWh) e a capacidade instalada do sistema fotovoltaico (kWp) (IEC, 1998; Silva *et al.*, 2016). Segundo Rampinelli (2014), este índice também pode ser determinado como a quantidade de horas que seriam necessárias para que o sistema produzisse em sua potência nominal a energia efetivamente gerada.

Deste modo, o Y_F é obtido por meio da expressão matemática:

$$YF = \frac{1}{P_{std}} \cdot \left[\frac{1}{\Gamma} \cdot \int_0^{\Gamma} Pca(t) \cdot dt \right], \quad (2.3.1)$$

em que:

Γ - Período de operação;

Pca - Potência entregue à rede elétrica;

$Pstd$ - Potência instalada do sistema em condições padrão (STD).

2.3.2 Produtividade de Referência

A Produtividade de Referência (Y_R), do inglês *Reference Yield*, é determinada pela razão entre a quantidade de irradiação solar total incidente no plano do sistema fotovoltaico e a irradiação padrão (1000 W/m²) (IEC, 1998; SILVA *et al.*, 2016).

Deste modo, o Y_R é obtido por meio da expressão matemática:

$$YR = \frac{H(\gamma, \beta)}{G_{std}}, \quad (2.3.2)$$

em que:

$H(\gamma, \beta)$ - Irradiação no plano do arranjo;

G_{STD} - Irradiação padrão de 1000 W/m².

2.3.2.1 Irradiação e irradiância

Para o cálculo do Y_R faz-se necessário determinar a irradiação no plano fotovoltaico (Silva *et al.*, 2016). A irradiação, também conhecida como insolação, é a integral do tempo da irradiância. A irradiação do plano do arranjo fotovoltaico é determinada por $H(\gamma, \beta)$, em que γ

é o ângulo do desvio azimutal, β a inclinação do arranjo fotovoltaico em relação ao plano horizontal. Uma determinada quantidade de irradiância é determinada por G . (IEC, 1998).

A expressão matemática que define a irradiação é:

$$H(\gamma, \beta) = \frac{1}{\Gamma} \int G(t) \cdot dt, \quad (2.3.2.1)$$

em que:

γ - Ângulo do desvio azimutal;

β - Ângulo de inclinação do arranjo;

G - Irradiância no plano do arranjo;

Γ - Período de operação do sistema.

A figura 2.1 aborda os principais ângulos envolvidos em energia solar:

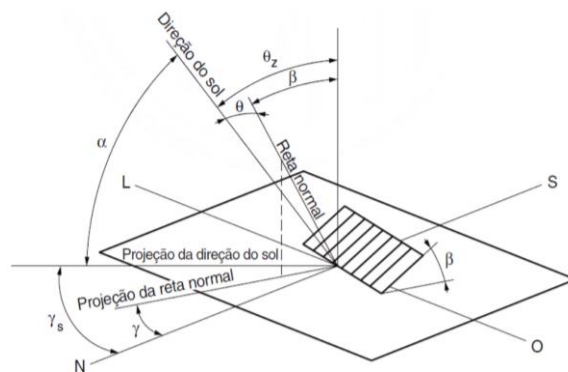


Figura 2.1. Principais ângulos em energia solar fotovoltaica. Fonte: NBR 10899, 2013.

em que:

α - Elevação ou altura solar;

β - Inclinação do arranjo fotovoltaico;

γ - Ângulo do desvio azimutal;

γ_s - Ângulo do desvio azimutal do sol;

θ_z - Ângulo de desvio zenital do sol;

θ - Ângulo de incidência.

2.4 DESEMPENHO GLOBAL

O Desempenho Global (PR), também denominado de taxa de desempenho, razão de desempenho ou razão de performance, do inglês *Performance Ratio*, é a razão entre a Produtividade do Sistema e a Produtividade de Referência (IEC,1998; SILVA *et al.*, 2016). De acordo com Sganzerla (2018), a taxa de desempenho pode ser definida também como a razão entre o desempenho real do sistema e o desempenho máximo teórico possível e para Yang (2020) ela consiste no montante de energia que efetivamente encontra-se disponível para a rede, descontando a energia perdida ao longo de todo o sistema.

Ainda segundo Almeida (2012), o Desempenho Global é um valor adimensional que expõem o efeito total de perdas e falhas em um sistema fotovoltaico, indicando o quanto sua operação se aproxima da operação ideal (PR igual a 1), o que permite comparar sistemas independentemente da localização geográfica, configuração e potência nominal, pois padroniza a produtividade em relação à irradiação solar. De acordo com a SMA Solar Technology AG (2010), os sistemas fotovoltaicos podem atingir valores de até 80% de PR .

O Desempenho Global leva em consideração o sistema em condições reais de atuação, ou seja, para melhor avaliar o PR deve-se examinar criteriosamente todas as perdas envolvidas (perdas por queda de tensão, temperatura, sujeira, sombreamento, carregamento do inversor, eficiência do inversor, incompatibilidade, resposta espectral) (PINHEIRO, 2014). Esse índice indica, também, o efeito geral das perdas na saída do sistema devido à temperatura da matriz, à utilização incompleta da irradiação e às ineficiências ou falhas dos componentes do sistema, incluindo o equilíbrio dos componentes do sistema (IEC,1998).

O Desempenho Global é obtido pela expressão matemática:

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R}, \quad (2.4)$$

Este índice é o mais utilizado para a comparação de desempenho elétrico entre sistemas fotovoltaicos conectados à rede, já que considera as perdas no processo de geração de energia solar em energia elétrica em corrente alternada (BENEDITO, 2009).

De acordo com Fusano (2013), o valor do desempenho global *PR* não deve ser confundido com a capacidade de energia a ser gerada pelo sistema fotovoltaico. Um sistema que apresenta um valor de *PR* elevado não significa que produz mais energia elétrica do que outro, que apresenta um valor menor deste índice, pois um sistema fotovoltaico pode gerar uma quantidade maior de energia elétrica apresentando um *PR* menor desde que esteja instalado em uma localidade que apresente uma melhor irradiação solar. Segundo Mello (2016) o índice *PR* é influenciado diretamente pela temperatura ambiente.

O cálculo da taxa de desempenho geralmente é realizado mensalmente e anualmente, pois seu valor varia ao longo do ano, visto que ela depende da irradiação solar e da energia gerada. A variação gradual do *PR* pode estar relacionada ao surgimento de sombreamentos, sujidade ou degradação do sistema fotovoltaico. Uma variação significativa do *PR* em períodos curtos pode indicar uma possível falha em algum componente do sistema, como na operação dos disjuntores, falhas em conexões, soldas ou no inversor. Os valores de *PR* tendem a ser mais elevados na estação inverno do que na estação do verão devido às menores perdas por temperatura (MARION *et al.*, 2005; FUSANO, 2013; SILVA *et al.*, 2016; YANG, 2020).

Há softwares que estimam a razão de desempenho. Um deles é o *System Advisor Model* (SAM), software de modelagem de performance de energias renováveis, o que inclui a energia solar. Outros softwares que podem ser utilizados para adquirir a *PR* de sistemas fotovoltaicos são o *PV*SOL* e *PVsystem*. (YANG, 2020).

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Os índices de mérito são indicadores de desempenho que permitem a comparação de diferentes sistemas fotovoltaicos vinculados à rede independentemente da localidade, configuração, design, tecnologia ou condição operacional. Além disso permitem identificar problemas operacionais dos sistemas avaliados e com isso, sinalizam o momento necessário de realizar ajustes ou manutenção.

3 CAPÍTULO III – METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a descrição dos procedimentos para obtenção dos índices de mérito de sistemas fotovoltaicos do IFG.

3.1 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O procedimento utilizado visa a obtenção dos índices FC , Y_F , Y_R e PR , conforme descrito no capítulo de referencial teórico. Para isso, é necessário realizar um levantamento de dados e, em seguida, realizar processamento de dados que permita a análise e interpretação.

Os procedimentos metodológicos são melhores apresentados no fluxograma da Figura 3.1 e descritos nos itens a seguir.

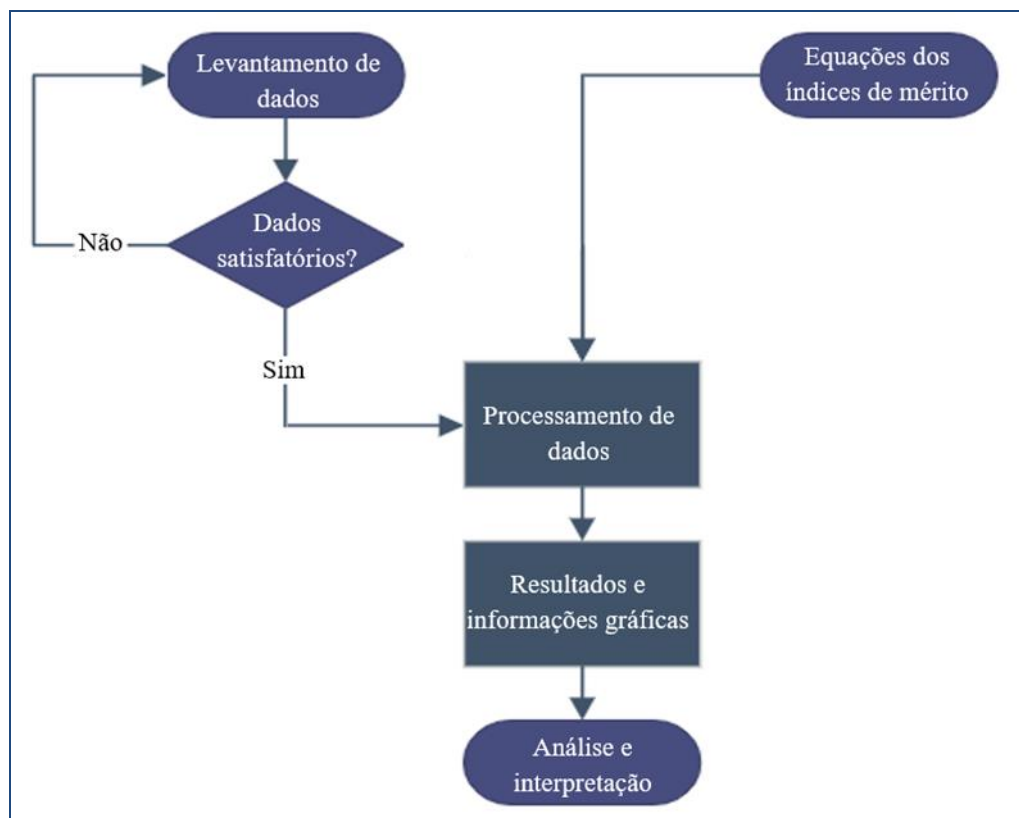


Figura 3.1: Fluxograma do procedimento metodológico.

3.1.1 Levantamento de dados

O método utilizado inicia-se com a aquisição dos dados referentes a localização, clima, meteorologia, potência instalada e geração de energia de cada sistema fotovoltaico.

Os dados de localização influenciam na determinação do clima, irradiação incidente e demais eventos meteorológicos na região onde o sistema fotovoltaico está instalado. Esses dados podem ser obtidos através da plataforma *Google Maps*, em que é possível coletar as coordenadas geográficas de qualquer localidade ou através de sites destinados a esse propósito, como o Cidade-Brasil.

Os dados de clima e meteorologia fornecem informações sobre possíveis causas na variação do desempenho de um sistema de energia solar em determinado período delimitado. Os dados de clima e meteorologia podem ser obtidos através dos endereços eletrônicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)³ e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)⁴. Os dados meteorológicos de irradiação, em específico, podem ser adquiridos com valores horários através da requisição ao INMET sobre a estação meteorológica visada e o período que deseja-se os dados e os dados de irradiação mensal podem ser obtidos através dos sites do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB)⁵, do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN)⁶, pertencente ao INPE ou podem ser adquiridos por softwares, como o Radiasol 2.

Os dados de potência instalada e geração de energia são os valores de produção de energia estimada e registrada, respectivamente, de um sistema fotovoltaico. A potência instalada pode ser obtida através dos projetos de engenharia e os dados de geração de energia elétrica podem ser obtidos por meio do inversor do sistema ou de forma remota, através de plataformas de monitoramento *online* e armazenamento de dados em nuvem.

Todos esses dados são essenciais para a determinação dos indicadores de desempenho e são utilizados de forma direta ou indireta nas equações destes índices. O período dos dados e

³ INMET: <https://portal.inmet.gov.br/>

⁴ INPE: <http://clima.cptec.inpe.br/>

⁵ CRESESB: <http://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>

⁶ LABREN: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html

da pesquisa são condicionados pela possibilidade de obter esses elementos, a qualidade dos dados adquiridos e delimitação pelo pesquisador do tempo a ser analisado.

3.1.2 Processamento de dados

A aquisição de dados de fontes reconhecidas, como o INMET, permite a transformação destes em informações com maior confiabilidade. Para o tratamento dos dados, é necessária a utilização de um software destinado a essa finalidade e que forneça diversas possibilidades de manipulação de dados, com bibliotecas consistentes que auxiliem no processamento e que, de preferência, tenha uma interface amigável ao usuário. Softwares com essas características são o *Microsoft Excel*, o *Google Planilhas*, dentre outros.

Os dados são aplicados nas equações dos índices de mérito fornecidos pela IEC61724 e adequados a esse tipo de pesquisa através da literatura acadêmica apresentada no Capítulo 2 deste trabalho.

Como resultado, obtém-se gráficos para a análise visual imediata do comportamento dos dados ao longo de um período e, em caso de comportamento irregular, essas informações são perceptíveis com maior clareza e passíveis de investigações.

3.1.3 Análise e interpretação dos resultados

A análise e interpretação dos resultados ocorre com a análise dos gráficos, com a verificação da coerência das informações obtidas com a literatura acadêmica, as possíveis causas das alterações nos comportamentos dos gráficos e as possíveis conclusões ou considerações a fazer-se sobre o sistema em estudo. É possível, também, avaliar e determinar as configurações e eventos que contribuíram para o melhor ou pior rendimento dos sistemas avaliados.

3.2 SÍNTESE DO CAPÍTULO

A metodologia do presente trabalho é descrita em 3 etapas: primeiro realiza-se o levantamento de dados (coleta de dados de localização, clima, meteorologia, potência instalada e geração de energia de cada sistema fotovoltaico), posteriormente efetua-se o processamento de dados (aplicação dos dados nos índices de mérito da IEC61724) e finaliza-se com a análise e interpretação das informações obtidas (observações, suposições e conclusões sobre os resultados).

4 CAPÍTULO IV – RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do estudo de caso I, realizado no Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG e do estudo de caso II realizado nos Câmpus Goiânia e Itumbiara do IFG. Ambos os casos correspondem a dados coletados no ano de 2021.

4.1 ESTUDO DE CASO I: ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA E DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE UMA PLANTA PILOTO

Este estudo tem o intuito de avaliar a credibilidade do método utilizado de cálculo para obtenção dos índices de mérito. Para isso, é selecionada uma microusina fotovoltaica em planta piloto, a qual possui duas *strings*, sob condições de arrefecimento distintas. A análise é realizada em um período cujo há dados apresentados na dissertação de mestrado “Projeto e implantação de sistema de arrefecimento para melhoria da eficiência energética de um sistema de geração fotovoltaica com supervisão online” (Mendes, 2021).

Este presente estudo complementa os resultados mostrados na dissertação e utiliza os resultados já publicados como referência para orientar as etapas do método adotado. Almeja-se comparar os resultados de geração de energia elétrica alcançados, adquiridos de forma remota, aos da pesquisa de pós-graduação e comparar o desempenho entre as *strings* analisadas.

A planta piloto está instalada no Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG e está localizada ao sul da região metropolitana de Goiânia. O município de Aparecida de Goiânia encontra-se na latitude 16° 49’ 23" sul e na longitude 49° 14’ 32" oeste (Cidade-Brasil, 2021). Essa região possui um clima tropical semiúmido e temperaturas elevadas a maior parte do ano (IBGE, 2002).

4.1.1 Levantamento de dados do sistema fotovoltaico

A microusina fotovoltaica em planta piloto é constituída por 18 painéis fotovoltaicos de 325 Wp e possui um total de 5,85 kWp de potência instalada. Os painéis estão agrupados em 2 *strings* com 9 painéis cada, em que a *string* superior é favorecida com o arrefecimento e a *string* inferior é isenta desse processo. A Figura 4.1 apresenta uma vista aérea da microusina solar.



Figura 4.1: Vista aérea da microusina solar fotovoltaica do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG. Fonte: MENDES, 2021.

A instalação da microusina em solo deve-se à facilidade para implantar os sistemas de arrefecimento e de monitoramento remoto da produção de energia, além de favorecer as ações de manutenção. Os painéis estão inclinados de acordo com o ângulo de latitude de sua localidade, com orientação para o norte geográfico (Mendes, 2021). A Figura 4.2 apresenta uma vista aérea dos painéis e a Figura 4.3 uma vista a partir do mesmo plano da planta piloto instalada no solo.



Figura 4.2: Vista aérea dos painéis da planta piloto instalada em solo do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG. Fonte: MENDES, 2021.



Figura 4.3: Vista lateral da planta piloto instalada em solo do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG. Fonte: MENDES, 2021.

O arrefecimento é utilizado para que a *string* superior não atinja temperaturas que excedam 40°C, o que segundo Heng *et al.* (2017) reduz a eficiência de geração elétrica do painel, enquanto a *string* não arrefecida atinge temperaturas proporcionais às condições ambientais (acima dos 40°C). Na borda de cima da *string* superior estão instalados os perfis de alumínio que promovem o arrefecimento por água potável (com intuito de posteriormente haver substituição por de água reuso) e na borda inferior dessa mesma *string* (entre a *string* superior e a *string* inferior) situa-se uma calha para receber a água utilizada e devolvê-la ao sistema de tratamento de esgoto. As figuras 4.4 e 4.5 apresentam os aspectos estruturais de arrefecimento da microusina fotovoltaica.



Figura 4.4: Calha de coleta da água de arrefecimento da *string* superior da planta piloto do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG. Fonte: MENDES, 2021.



Figura 4.5: Perfis de alumínio para arrefecimento da *string* superior da planta piloto do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG. Fonte: MENDES, 2021.

A operação com diferentes condições de temperaturas entre as duas *strings* permite a comparação da geração de energia elétrica e de desempenho da microusina.

4.1.2 Resultados e comparação da geração de energia entre as *strings* com e sem arrefecimento

Os dados de produção de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos em planta-piloto analisados são apresentados de forma gráfica. O uso de gráficos tem êxito na exposição do comportamento dos dados e facilita a detecção de alterações no comportamento dos elementos verificados.

Neste estudo de caso, os dados de produção de energia elétrica foram obtidos através de um sistema de monitoramento *online*, de forma remota. O sistema de monitoramento forneceu arquivos diários, em formato ‘.txt’, contendo a corrente, a tensão e demais dados registrados em cada dia, das 08h às 18h, dos sensores instalados no sistema fotovoltaico. Através do software *Matlab*, esses dados foram manipulados para fornecer a produção de energia elétrica das 2 *strings* para cada dia de análise.

O estudo correspondeu ao período de 23 de janeiro à 05 de fevereiro de 2021. O período foi delimitado com base na presença ininterrupta dos dados coletados, uma vez que o sistema em planta piloto estava em fase inicial de atuação e esteve sob ajustes e manutenção, prejudicando a coleta de dados de mais dias consecutivos. A microusina esteve em atividade do início de janeiro à meados de março de 2021.

O gráfico com a geração de energia elétrica diária e a comparação entre as *strings* com e sem arrefecimento podem ser visualizados no Gráfico 4.1.

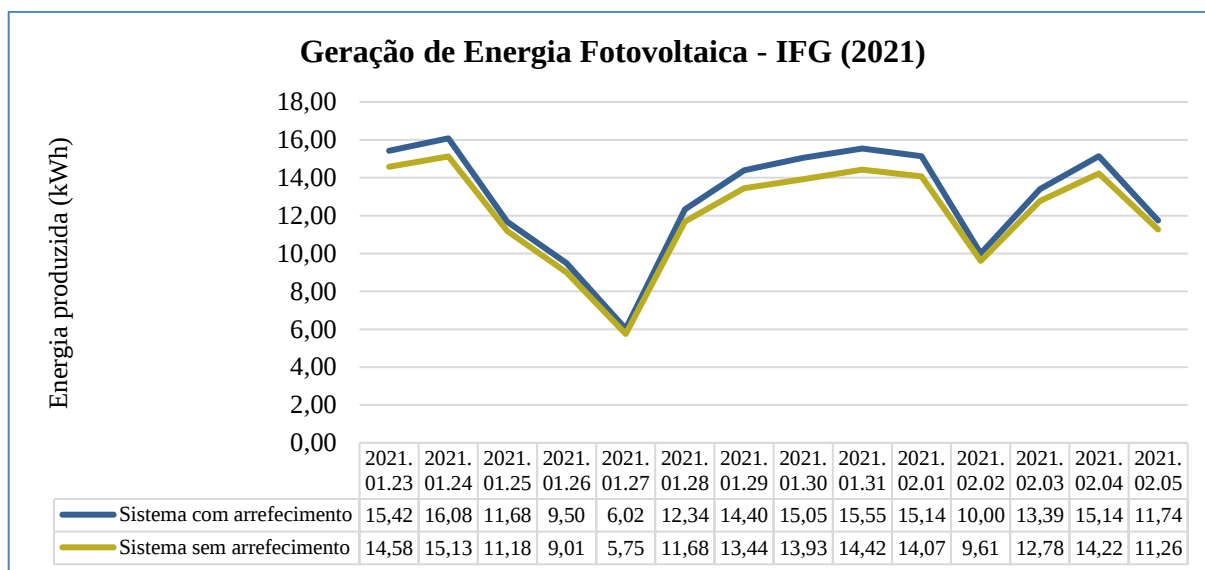


Gráfico 4.1: Geração diária de energia elétrica do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG (2021).

A produção de energia elétrica total da *string* com arrefecimento foi de 181,44 kWh e a da *string* sem arrefecimento foi de 171,06 kWh nos 14 dias de observação, atribuindo a toda microunidade fotovoltaica a geração de 352,50 kWh. É possível, através da verificação da sequência de dados, concluir que o sistema com arrefecimento apresentou melhor desempenho, apresentando ganhos diários de até 1,13 kWh em relação à sem arrefecimento.

Para averiguar a credibilidade dos valores obtidos, os dados do dia 31 de janeiro, presentes no Gráfico 4.1, foram comparados aos valores obtidos na dissertação mencionada anteriormente, para o mesmo dia. De acordo com Mendes (2021), a pesquisa de mestrado abordou a produção de energia elétrica no período em que as *strings* encontravam-se em temperaturas iguais ou superiores a 40°C e como resultado, obteve para a *string* com arrefecimento o valor de geração de 13,75 kWh e para a *string* sem arrefecimento, 12,67 kWh.

Este estudo de caso aborda a produção de energia elétrica sem restrições de temperatura e para o dia 31 de janeiro obteve para a *string* com arrefecimento o valor de geração de 15,55 kWh e para a *string* sem arrefecimento, 14,42 kWh. Os valores superiores deste estudo em relação aos da dissertação permite concluir que há credibilidade nos resultados. Com isso, constata-se que os valores do Gráfico 4.1 alcançam o resultado esperado.

4.1.3 Resultados e comparação dos índices de mérito entre as *strings* com e sem arrefecimento

Com os dados de produção de energia adquiridos, os gráficos dos indicadores de mérito diários de FC , Y_F e PR das *strings* com e sem arrefecimento são obtidos. Para obter o índice PR , é necessário, ainda, os dados diários de radiação, utilizados no Y_R . Esses índices são empregados para caracterizar o desempenho de um sistema fotovoltaico em relação a efeitos de perdas e contribuem na identificação de problemas operacionais (SILVA *et al.*, 2016). O Gráfico 4.2 apresenta o Fator de Capacidade de ambas as *strings* da planta piloto.

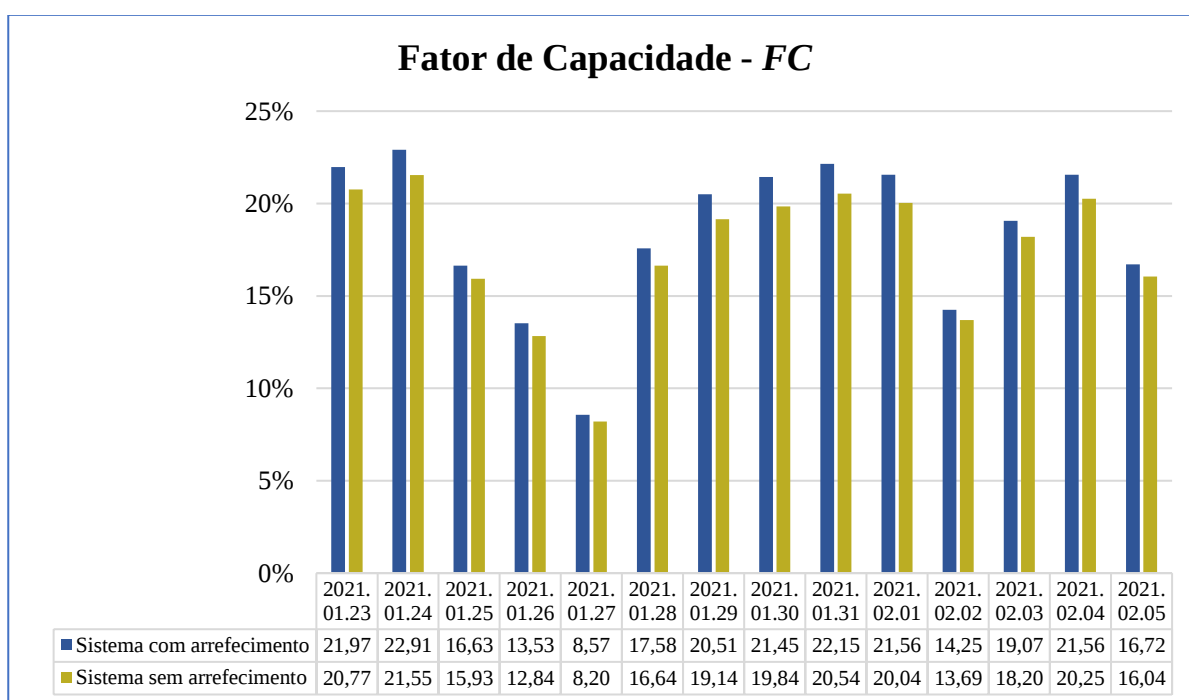


Gráfico 4.2: Fator de Capacidade das *strings* em planta-piloto do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG (2021).

O Fator de Capacidade é obtido através da relação entre energia realmente produzida e a energia teoricamente gerada caso o sistema atuasse em potência nominal no decorrer de todo o período delimitado. Para este gráfico, utilizou-se a razão entre os dados diários de geração de energia elétrica e os dados de capacidade instalada em cada *string* multiplicadas por 24h. Segundo Benedito (2009), o FC que obtém-se varia entre 13 e 18% de acordo com o tipo de sistema.

A análise gráfica permite confirmar a porcentagem reduzida deste índice de energia solar, o qual deve-se a perdas no sistema e é acentuado pela exposição diária limitada a

radiação do Sol. Os resultados fornecem uma variação de 8 a 22% de FC para as *strings* a depender do dia verificado. É observado ainda, que a *string* com arrefecimento possui performance sutilmente superior neste índice, com diferença de FC de até 1,61%.

O Gráfico 4.3 apresenta a Produtividade do Sistema de ambas as *strings* da microusina solar.

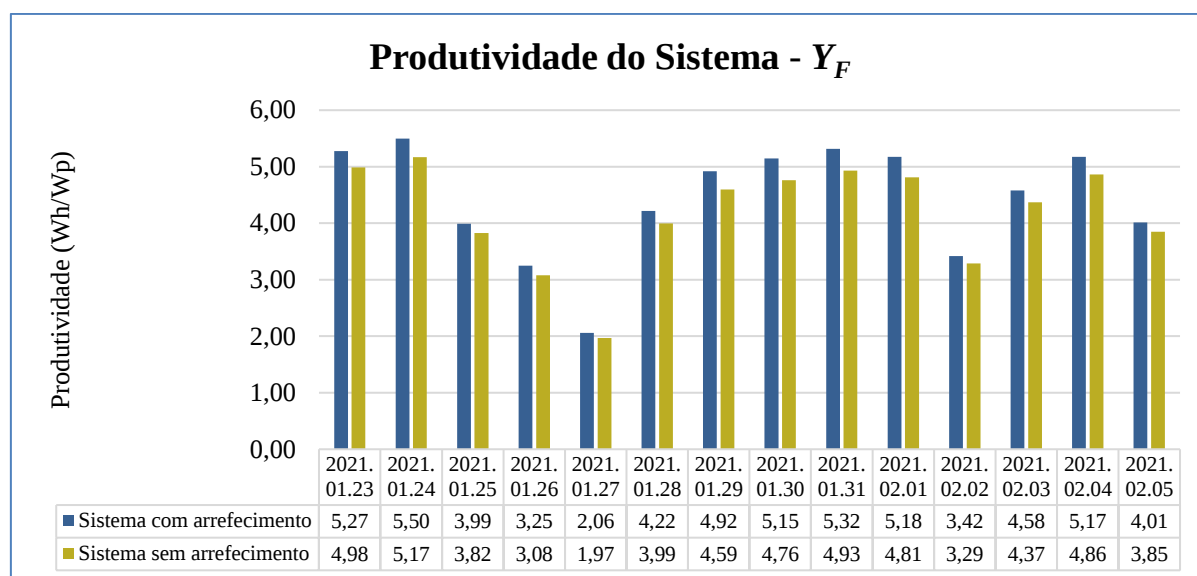


Gráfico 4.3: Produtividade do Sistema das *strings* em planta-piloto do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG (2021).

O índice de produtividade do sistema é adquirido pela relação entre a energia elétrica gerada e a capacidade instalada do sistema de energia solar. Para este gráfico, usou-se a razão entre os dados diários de produção de energia elétrica e os dados de capacidade instalada em cada *string*.

Observa-se que a rendimento das *strings* varia de 1,97 à 5,50 Wh/Wp ao longo de todo o período avaliado e que as *strings* apresentam desempenho semelhantes, com ganhos de produtividade de até 1% da *string* arrefecida em comparação com a *string* sem arrefecimento.

O Gráfico 4.4 apresenta o Desempenho Global de ambas as *strings* do sistema fotovoltaico.

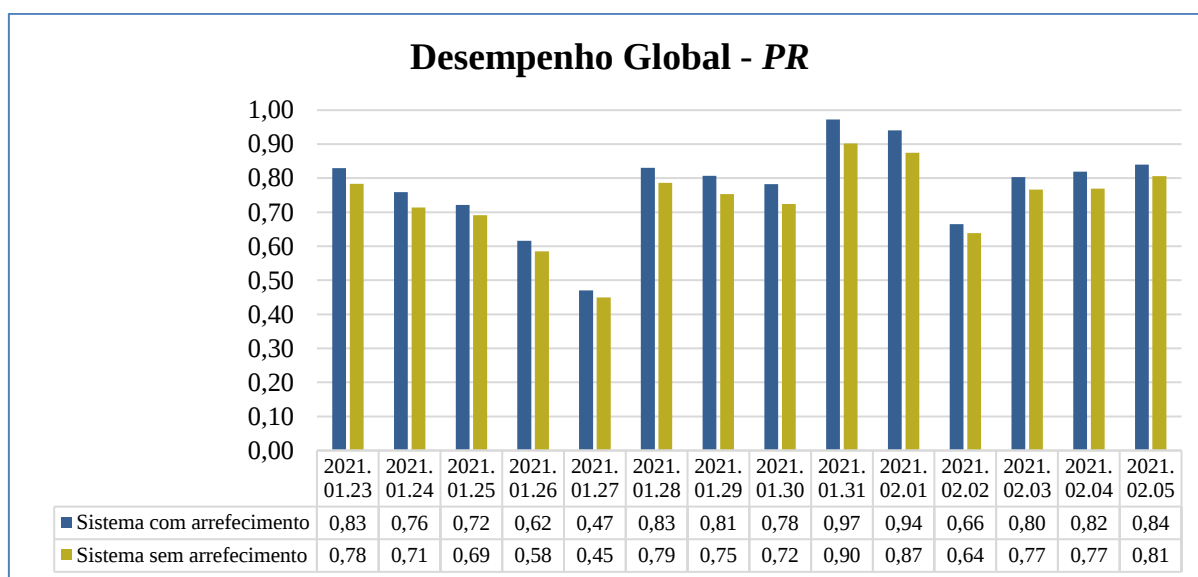


Gráfico 4.4: Desempenho Global das *strings* em planta-piloto do Câmpus Aparecida de Goiânia do IFG (2021).

O indicador de Desempenho Global é obtido pela relação entre a Produtividade do Sistema e a Produtividade de Referência. Segundo Sganzerla (2018), essa taxa de performance pode ser definida também como a razão entre o rendimento real do sistema e o máximo rendimento teórico possível. Para a criação deste gráfico, utiliza-se a razão entre os dados diários de Y_F e os dados diários de Y_R , obtidos a partir dos dados horários de radiação solar fornecidos pelo INMET. Os dados de radiação foram registrados pela estação meteorológica automática A002 e são referentes a cidade de Goiânia, localidade mais próxima com esse monitoramento.

Os dados de radiação solar concedidos encontravam-se em registros horários e em kJ/m^2 . Para obter os dados diários é necessário realizar a somatória destes elementos horários, dia por dia, e realizar a conversão de unidade de energia, de térmica (kJ/m^2) para elétrica (kWh/m^2) por meio da constante $0,27778 \times 10^{-3}$ ($3600\text{J/s} = 1 \text{ Wh}$)(BUENO *et al.*, 2016). A radiação fornecida não tem especificação sobre o ângulo em que é captada (plano horizontal ou inclinado) e é utilizada por abranger o período delimitado do estudo com dados na escala adequada (horário).

A análise gráfica indica que os valores diários de PR variam entre 0,64 e 0,97 durante o período da pesquisa e nenhum dos dados atinge o valor de 1. Segundo Almeida (2012), quanto mais próximo da localização geográfica e inclinação ideal, maior a aproximação dessa taxa ao rendimento nominal total. Por meio dessas informações, também é possível avaliar o

avanço na tecnologia empregada nos sistemas fotovoltaicos e configurações de instalação, uma vez que há valores que ultrapassam os 80% (ou 0,8), porcentagem máxima a qual a *PR* deveria alcançar segundo a SMA Solar Technology AG (2010), há mais de uma década.

Ressalta-se que este índice abrange aspectos como perdas em geral na saída do sistema, temperatura das *strings* e falhas de componentes. A variação gradual do desempenho global pode estar relacionada com sombreamentos, sujeidade ou degradação do equipamento, enquanto variações diárias podem representar nebulosidade atmosférica ou falha operacional.

Conclui-se, com base no Gráfico 4.4, que a *string* refrigerada apresenta a maior *PR*, com ganhos de 2 à 7% em relação a *string* não arrefecida.

4.2 ESTUDO DE CASO II: ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA E DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE QUATRO SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Este estudo tem o intuito de aplicar o método aprovado de cálculo para obtenção dos índices de mérito. Para isso, são selecionados 4 sistemas fotovoltaicos, dos quais três localizam-se no Câmpus Goiânia do IFG e um no Câmpus Itumbiara do IFG. A análise é realizada com dados dos sistemas fotovoltaicos condicionados a ações de intemperismo por um período trimestral. A proposta de analisar uma situação mais complexa e com eventos adversos é avaliar e determinar a configuração com a melhor performance.

Os sistemas vinculados aos inversores 5 (SFV 5) e 6 (SFV 6) foram escolhidos por disporem da mesma configuração operacional e localizarem-se sobre o mesmo telhado, tornando possível a comparação e verificação da variação de rendimento de cada um de seus sistemas fotovoltaicos, sob as mesmas condições ambientais. O sistema vinculado ao inversor 7 (SFV 7) foi escolhido pela facilidade de manutenção (eventuais ajustes) de seu sistema fotovoltaico e visa-se comparar seu desempenho com os vinculados aos inversores 5 e 6, instalados em outro local do mesmo Câmpus. O sistema fotovoltaico vinculado ao inversor do bloco 400 (SFV B400) do Câmpus Itumbiara foi escolhido pela qualidade dos dados obtidos e localizar-se em outra cidade.

A cidade de Goiânia situa-se na latitude 16° 40' 48'' Sul e longitude 49° 15' 18'' Oeste, na região central do estado de Goiás. O município de Itumbiara localiza-se na latitude 18° 25' 18'' Sul e longitude 49° 12' 56'' Oeste, na região sul do estado (Cidade-Brasil, 2021). O estado de Goiás possui um clima tropical semiúmido e registra altas temperaturas a maior parte do ano (IBGE, 2002).

4.2.1 Levantamento de dados dos quatro sistemas fotovoltaicos

O sistema fotovoltaico vinculado ao inversor 5 do Câmpus Goiânia do IFG é constituído por 114 painéis fotovoltaicos de 325 Wp. O inversor é de 30 kW e a capacidade instalada do sistema é de 37,050 kWp. O sistema fotovoltaico vinculado ao inversor 6 do Câmpus Goiânia do IFG possui as mesmas características do SFV 5. Os sistemas fotovoltaicos de ambos os inversores estão instalados acima do telhado do bloco 300 da instituição e possuem inclinação conforme a latitude do Câmpus, com orientação para o norte geográfico. A Figura 4.6 ilustra a vista aérea desta usina solar.



Figura 4.6: Vista aérea da usina solar fotovoltaica do Câmpus Goiânia do IFG. Fonte: 3E ENGENHARIA, 2020.

A Figura 4.7 apresenta 6 inversores, os quais atendem aos blocos 300, 400 e 500, da direita para esquerda. Os dois inversores que estão mais à direita, indicados pelos retângulos, são os inversores 5 e 6.

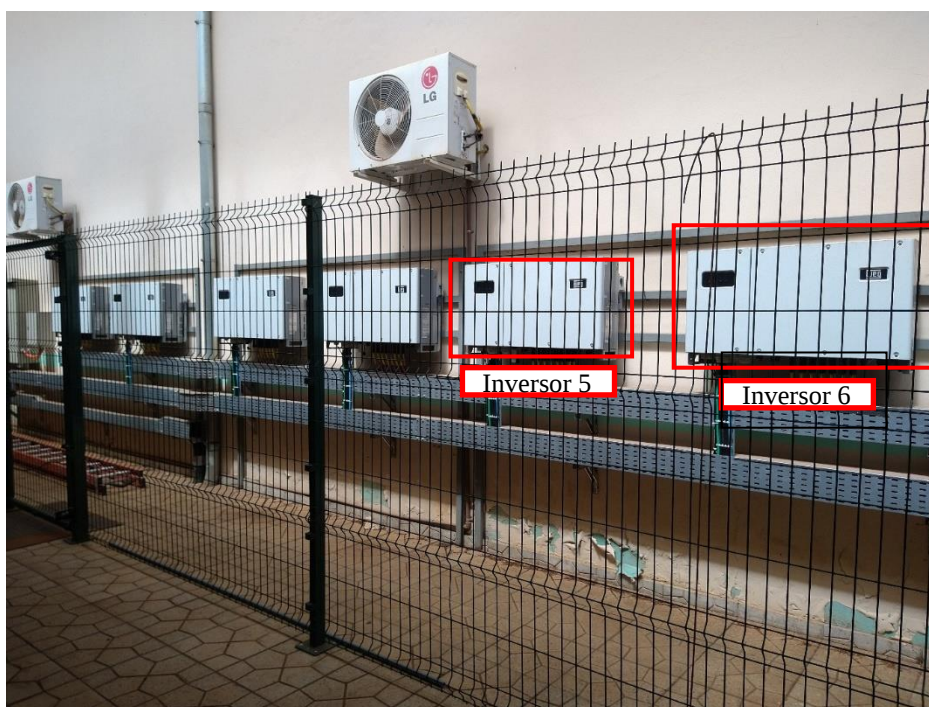


Figura 4.7: Inversor 5 e 6 do Câmpus Goiânia do IFG.

O sistema fotovoltaico vinculado ao inversor 7 do Câmpus Goiânia é constituído por 93 painéis de 325 Wp. O inversor é de 30 kW e a capacidade instalada é de 30,225 kWp. O sistema fotovoltaico deste inversor está localizado acima do telhado do Miniauditório Demartin Bizerra da Silva e sala dos professores e a inclinação dos painéis corresponde ao ângulo de latitude de Goiânia, com orientação para o norte geográfico. A imagem do inversor 7 é apresentada na Figura 4.8.

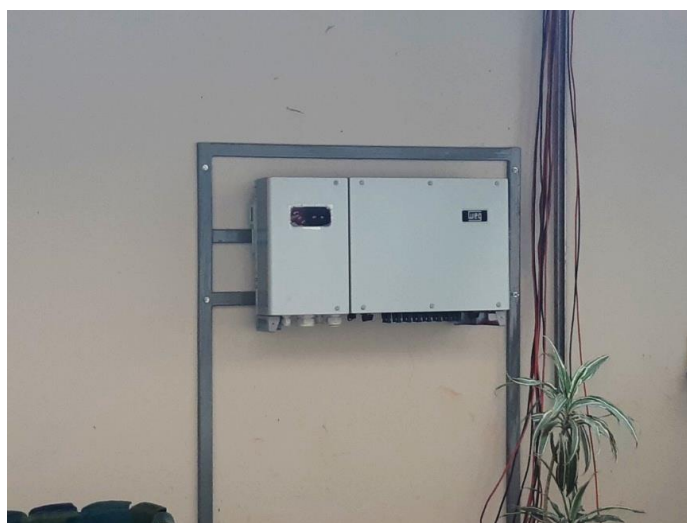


Figura 4.8: Inversor 7 do Câmpus Goiânia do IFG.

Os dados dos SFV's vinculados aos inversores do Câmpus Goiânia foram retirados do projeto elétrico de energia solar do Câmpus.

O sistema fotovoltaico vinculado ao inversor do bloco 400 do Câmpus Itumbiara do IFG é constituído por um sistema de 70 painéis de 325 Wp. O inversor é de 20 kW e a capacidade instalada é de 22,750 kWp. Esse sistema fotovoltaico está localizado acima do telhado no bloco 400 do instituto e possui inclinação similar à base em que está instalado (aproximadamente 10°) e está orientado para o sudeste geográfico. A figura 4.9 apresenta a vista aérea desta usina solar.



Figura 4.9: Vista aérea da usina solar do Câmpus Itumbiara do IFG.

Os dados do SVF B400 do Câmpus Itumbiara foram fornecidos pela gestão de energia solar da unidade.

4.2.2 Resultados e comparação da geração de energia entre os quatro sistemas fotovoltaicos

Os dados de produção de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos analisados são apresentados de forma gráfica. O primeiro gráfico corresponde a geração de energia elétrica mensal. O segundo gráfico corresponde ao comportamento diário da geração de energia verificada e permite uma análise intuitiva de suas eventuais alterações.

Neste estudo de caso, os dados de produção de energia elétrica dos SFV 5, 6 e 7 do Câmpus Goiânia foram coletados *in loco* diretamente dos inversores dos respectivos equipamentos. Os dados adquiridos correspondem as produções diárias e mensais dos inversores, em kWh. Os mesmos dados referentes ao SFV B400 do Câmpus Itumbiara do IFG foram fornecidos pelos responsáveis da usina solar da instituição.

O período de medição dos dados é compreendido de 01 de julho de 2021 à 30 de setembro de 2021, abrangendo praticamente toda a estação do inverno do hemisfério sul e que conta com meses característicos: julho (frio e ventanias), agosto (abafado e seco) e setembro (quente e com atmosfera instável). O período está delimitado com base no início da atuação da usina solar do Câmpus Goiânia, que iniciou sua operação ao final do mês de junho de 2021 e aos dados coletados em meados do mês de outubro do mesmo ano.

As informações com a geração de energia elétrica mensal e a comparação entre os SFV podem ser visualizados no Gráfico 4.5.

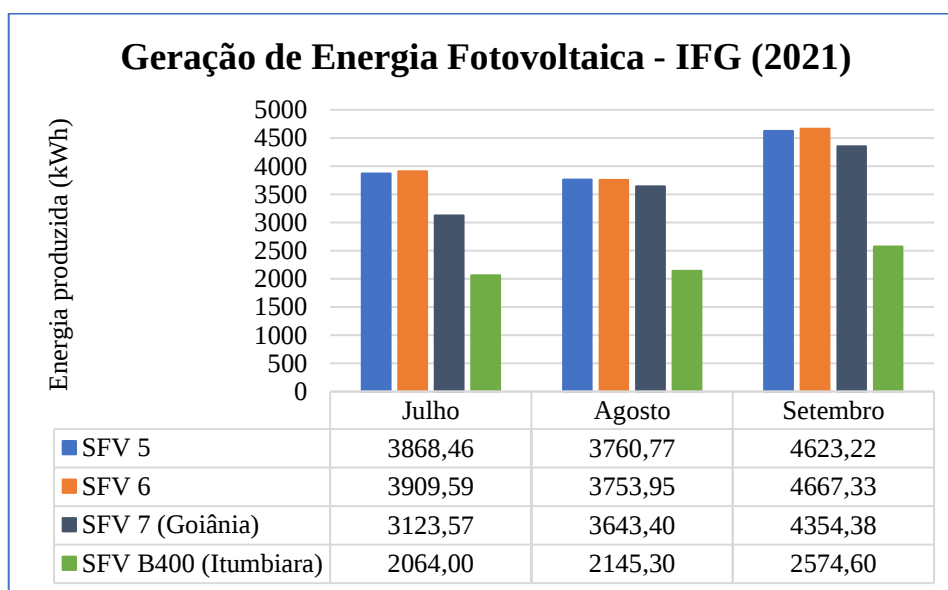


Gráfico 4.5: Geração mensal de energia elétrica dos Câmpus Goiânia e Itumbiara do IFG (2021).

A produção de energia elétrica total para o SFV 5 é de 12.252,45 kWh, para o SFV 6 é de 12.330,87 kWh, para o SFV 7 é de 11.121,35 kWh e para o SFV B400 é de 6783,90 kWh no trimestre analisado, atribuindo ao conjunto dos três sistemas fotovoltaicos do Câmpus Goiânia a geração total de 35.704,67 kWh para o mesmo período.

Os SFV 5 e 6 apresentam ligeira queda de produção no mês de agosto e aumento considerável no mês de setembro, no qual é observado o ganho superior a 850kWh para cada

um. A diferença de produção entre os dois sistemas é de 41,13 kWh em julho, 6,82 kWh em agosto e 44,11 kWh em setembro, mês com a maior variação.

Conclui-se que para sistemas fotovoltaicos com a mesma configuração operacional, com a mesma localização e mesmas condições atmosféricas há disparidades na conversão de energia solar em energia elétrica. Dentre as possíveis causas, pode-se atribuir a sujidade em painéis específicos, bem como falha nas conexões de cabos dos mesmos.

O SFV 7 apresenta aumentos consecutivos e expressivos de geração durante os três meses da pesquisa. Em relação a julho, a produção eleva-se 519,83 kWh em agosto e tem ganho de 710,98 kWh em setembro (em relação a agosto). Constata-se que entre os SFV 5 e 6 e o SFV 7, os dois primeiros possuem geração mensal superior em todos os meses, com a maior variação em julho e a menor em agosto. O SFV B400 apresenta aumentos consecutivos e tênues de geração no período abordado. Em relação a julho, a produção eleva-se 81,30 kWh em agosto e tem ganho de 429,30 kWh em setembro (em relação a agosto).

Verifica-se que entre os SFV 5, 6, 7 e B400, o último possui a menor geração mensal, não ultrapassando a produção de 2600 kWh, enquanto a produção dos outros três SFV's é superior a 3100 kWh.

4.2.2.1 Análise sobre o comportamento diário da geração de energia elétrica

O Gráfico 4.6 apresenta a geração de energia elétrica de cada um dos SFV's e a comparação entre os mesmos, com intervalos de 3 dias entre as medições.

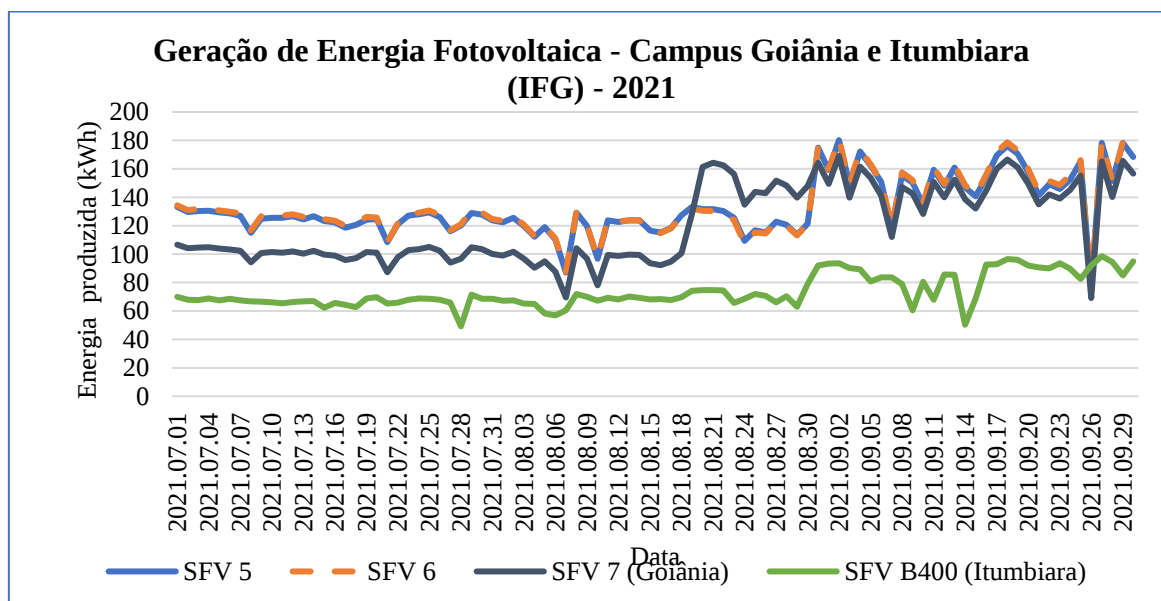


Gráfico 4.6: Geração diária de energia elétrica dos Câmpus Goiânia e Itumbiara do IFG (2021).

Os valores da produção diária de eletricidade influenciam no rendimento dos sistemas, bem como nos indicadores de desempenho operacionais. Devido a isso, é necessário analisar o comportamento diário da geração de energia elétrica e os fatores que o influenciam.

O Gráfico 4.6 é comparado aos gráficos de radiação e pluviosidade de Goiânia, gerados a partir dos dados fornecidos pelo banco de dados do INMET para mesmo período deste estudo de caso. O comportamento do SFV B400 não foi contemplado na análise por estar localizado em outro município.

O Gráfico 4.7 apresenta a comparação entre os dados de geração de energia elétrica e os dados meteorológicos de radiometria e pluviosidade, com intervalos 3 de dias entre as medições.

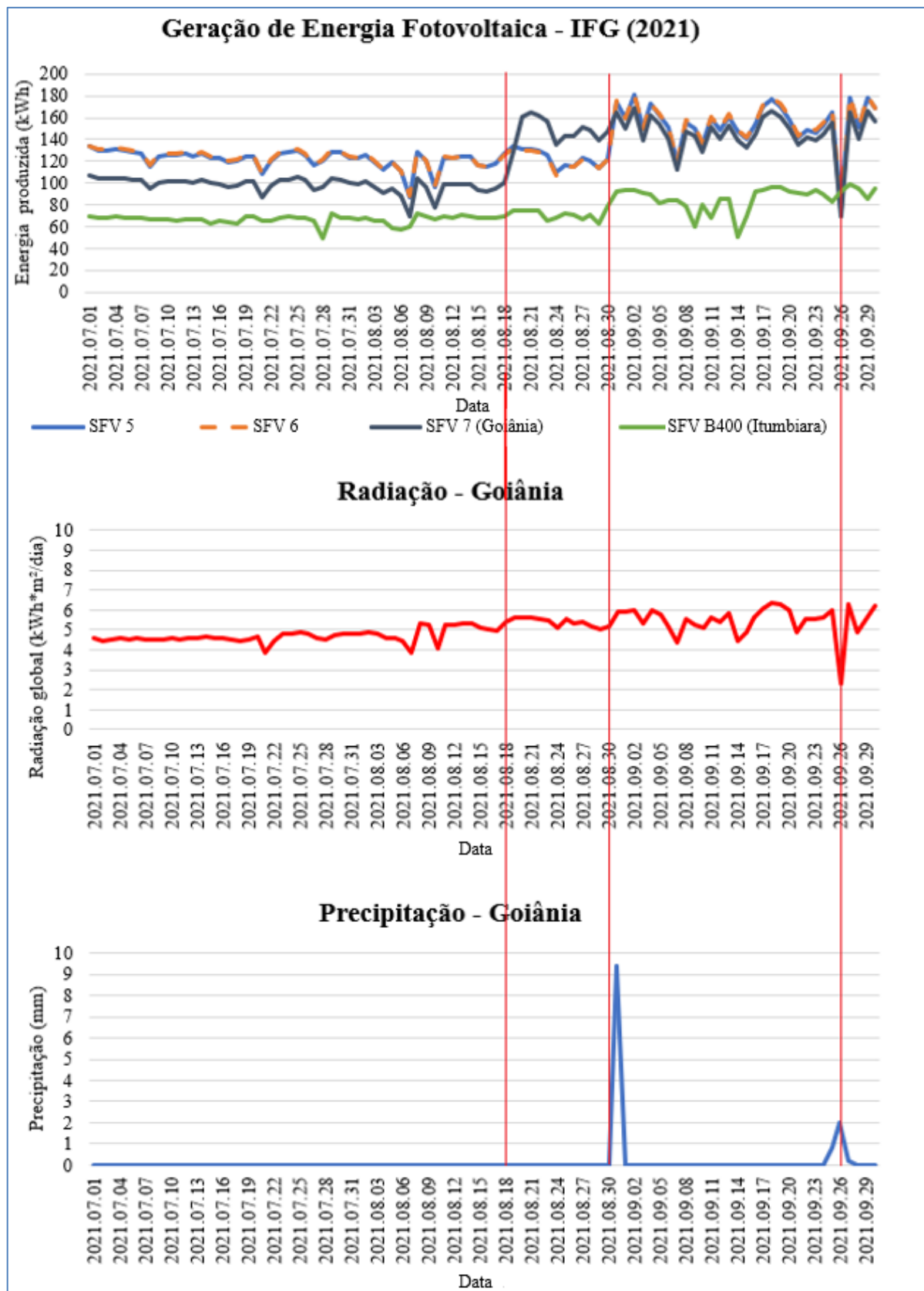


Gráfico 4.7: Comparação entre a geração diária de energia elétrica do Câmpus Goiânia com dados meteorológicos local (2021).

A análise preliminar da comparação dos gráficos sugere que a geração dos sistemas fotovoltaicos está intrinsicamente relacionada a radiação recebida, com o comportamento da geração de energia dos três SFV's similares ao da radiação.

Observa-se, no Gráfico 4.7, que a radiação eleva-se gradualmente durante todo o período analisado, com eventuais alterações. Esse comportamento deve-se ao aumento do período diário com presença solar na cidade, uma vez que no dia 01 de julho, Goiânia registra 11h07 de Sol, enquanto no dia 30 de setembro, registra 12h12 (SUNRISE-AND-SUNSET, 2021).

É observado, também, três alterações bruscas nos gráficos dos SFV's. As causas desses aspectos são investigadas.

1º Aspecto: Ganho de geração apenas do SFV 7

No dia 18 de agosto de 2021 foi realizado a limpeza dos painéis desse sistema fotovoltaico. Esse evento proporcionou o ganho de produtividade energética, a qual manteve-se até o fim do período analisado. Em um comparativo, o dia 15 apresentou a radiação de 5,124 kWh/m²*dia e geração de 93,48 kWh, enquanto o dia 21, apresentou radiação de 5,611 kWh/m²*dia e geração de 164,37 kWh. Ressalta-se que o SFV 7 possui potência instalada menor que os SFV 5 e 6 e apresenta maior geração, estando os mesmos na mesma instituição e em localizações geográficas próximas.

Com este resultado é possível determinar que a sujeidade impacta a geração de energia elétrica do sistema acoplado ao inversor 7. A sujeidade pode ser decorrente de poeira, fuligem, excremento de aves ou insetos.

Os dados da média diária de produção de energia elétrica do SFV 7 antes e após a realização da limpeza podem ser observados nos Gráficos 4.8 e 4.9.

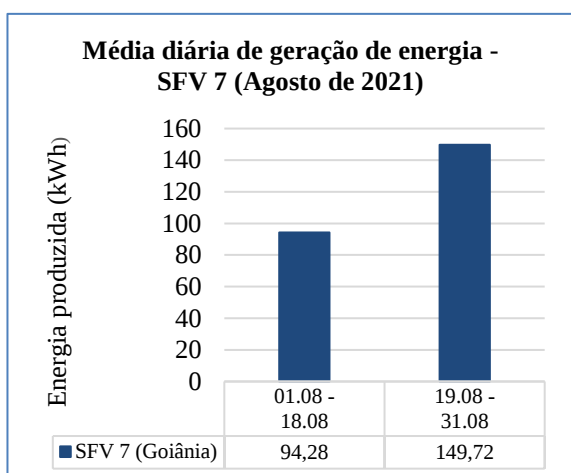


Gráfico 4.8: Comparação entre a média diária de geração de energia elétrica do SFV 7 com e sem sujidade somente no mês de agosto (2021).

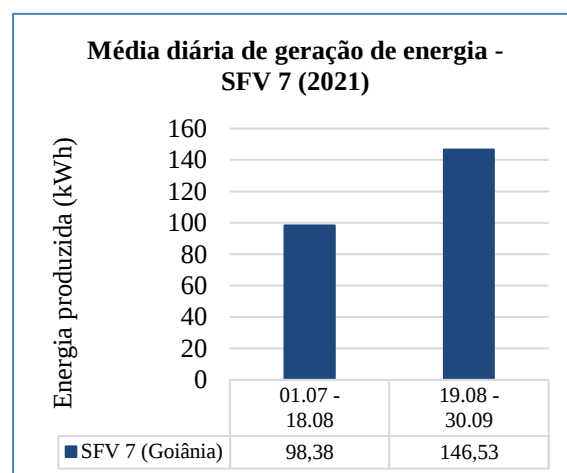


Gráfico 4.9: Comparação entre a média diária de geração de energia elétrica do SFV 7 com e sem sujidade (2021).

O Gráfico 4.8 dispõem da comparação da média diária de geração de energia elétrica do SFV 7 antes e após a realização da limpeza, somente no mês de agosto. É observado que nos primeiros 18 dias do mês, a média diária de geração é de 94,28 kWh, enquanto nos últimos 12 dias, é de 149,72 kWh, o que corresponde a um aumento de 58,80% da produção em relação a primeira parte do mês. A geração total, nos primeiros 18 dias é de 1.697,04 kWh e nos últimos 12 dias, 1.796,64 kWh.

O Gráfico 4.9 fornece a comparação da média diária de geração de energia elétrica do SFV 7 antes e após a realização da limpeza, durante os 92 dias de estudo. Verifica-se que nos primeiros 49 dias a média diária de geração de energia elétrica é de 98,38 kWh e nos últimos 43 dias, de 146,53 kWh. O período sem sujidade apresenta um aumento de 48,94% da produção em relação ao período com sujidade. A geração total, nos primeiros 49 dias é de 4.820,62 kWh e nos últimos 43 dias, 6.300,79 kWh.

A média diária é adotada para comparação por possibilitar uma visualização imediata no impacto da sujidade no sistema fotovoltaico.

2ª Aspecto: Ganho de geração dos inversores 5, 6 e 7

No dia 30 de agosto de 2021 é está registrado pela estação meteorológica automática da cidade de Goiânia ao menos 9mm de pluviosidade. Após esse evento atmosférico ao final do período de estiagem, é perceptível o ganho de produtividade de energia elétrica nos sistemas fotovoltaicos dos SFV 5 e 6 entre os dias 30 de agosto e 02 de setembro.

Com este evento, é observado no Gráfico 4.7 que a geração de energia dos SFV 5 e 6 tornam-se sutilmente superiores aos produzidos pelo SFV 7, o qual durante o período pós limpeza e antes da precipitação apresentou a melhor conversão de energia solar em energia elétrica. Com este resultado, supõem-se com base na primeira alteração analisada que a causa desta melhoria de desempenho deve-se a limpeza da sujidade presente nos painéis dos SFV 5 e 6 pela água pluvial.

Nota-se que a diferença de geração entre os SFV 5 e 6 e o SFV 7 antes do dia 18 de agosto é maior do que a visualizada após o dia 02 de setembro, podendo-se presumir que a limpeza proporcionada pela água pluvial não substitui os serviços de limpeza específicos para esses equipamentos.

Observa-se ainda, no Gráfico 4.7, que a geração dos três sistemas fotovoltaicos mantém-se alta nos dias posteriores a precipitação, o que torna possível supor que houve uma maior recepção de radiação solar, provavelmente proveniente de uma atmosfera com menos impurezas. Agosto é conhecido por ser um mês com temperaturas amenas, baixa umidade do ar e com atmosfera abafada, devido a presença de fumaça oriunda de queimadas em ambientes naturais, fuligem, poluição urbana e poucos ventos.

Comparando-se os dados de radiação e precipitação, nota-se que não houve alteração no comportamento da radiação incidida sobre a estação meteorológica, indicando, portanto, que o fenômeno atmosférico ocorreu no período noturno. Os dados de pluviosidade foram adquiridos após a solicitação ao banco de dados do INMET sobre estação meteorológica almejada.

3º Aspecto: Queda de geração dos SFV's 5, 6 e 7

Está registrado pela estação meteorológica automática da cidade de Goiânia ao menos 2mm de pluviosidade no dia 26 de setembro de 2021 e ao menos 4 dias consecutivos de precipitações. Durante este evento, os gráficos de geração de energia elétrica e radiação indicam acentuada queda em seus valores, o que torna possível avaliar que a causa é proveniente de um período com nebulosidade constante.

4.2.3 Resultados e comparação dos índices de mérito entre os quatro sistemas fotovoltaicos

Os dados de geração de energia elétrica mensal adquiridos e analisados possibilitam a obtenção dos índices de mérito FC , Y_F e PR mensais. Para o obter índice PR , é necessário, ainda, os dados mensais de Y_R , obtidos por meio dos dados mensais de radiação.

O Gráfico 4.10 apresenta o Fator de Capacidade dos 4 sistemas fotovoltaicos do IFG analisados.

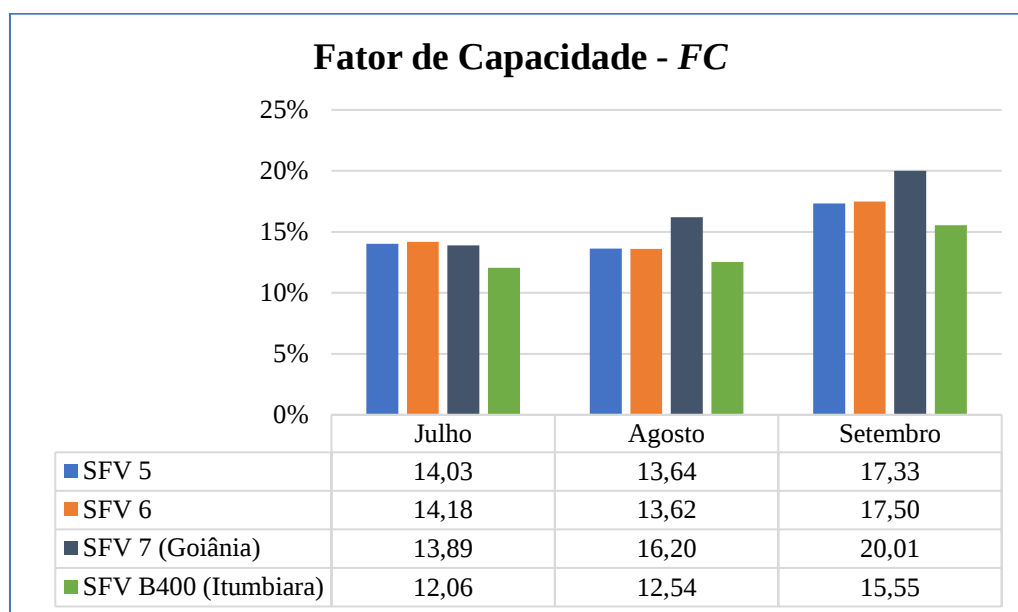


Gráfico 4.10: Fator de Capacidade dos SFV 5, 6, 7 e B400 do IFG (2021).

A análise gráfica desses resultados permite identificar o aumento gradativo do FC dos quatro SFV's analisados, no período de julho a setembro. Em julho, o maior resultado deste índice alcançou 14,18%, enquanto em setembro o menor resultado é de 15,55%. Os resultados dos 3 meses de estudo fornecem a variação de 12 a 20% de FC .

Observa-se que em julho, os SFV's do Câmpus Goiânia apresentam Fator de Capacidade semelhantes, enquanto o sistema fotovoltaico do Câmpus Itumbiara apresenta um resultado aproximadamente 2% inferior em relação aos demais. Em agosto, é observado aumento expressivo desse índice no SFV 7, de 2,31%. A influência da limpeza no FC do SFV 7 demonstra a importância dessa ação. Em setembro há uma elevação nesse indicador em todos os sistemas fotovoltaicos, com o SFV 7 apresentando, ao menos, 2,5% a mais que os demais SFV's, evidenciando que a limpeza e arrefecimento proporcionado pela pluviosidade

não substitui a limpeza especializada, uma vez que o FC do SFV 7 acompanha o aumento dos demais sistemas e permanece com a maior porcentagem.

O Gráfico 4.11 apresenta a Produtividade do Sistema dos quatro SFV's do IFG.

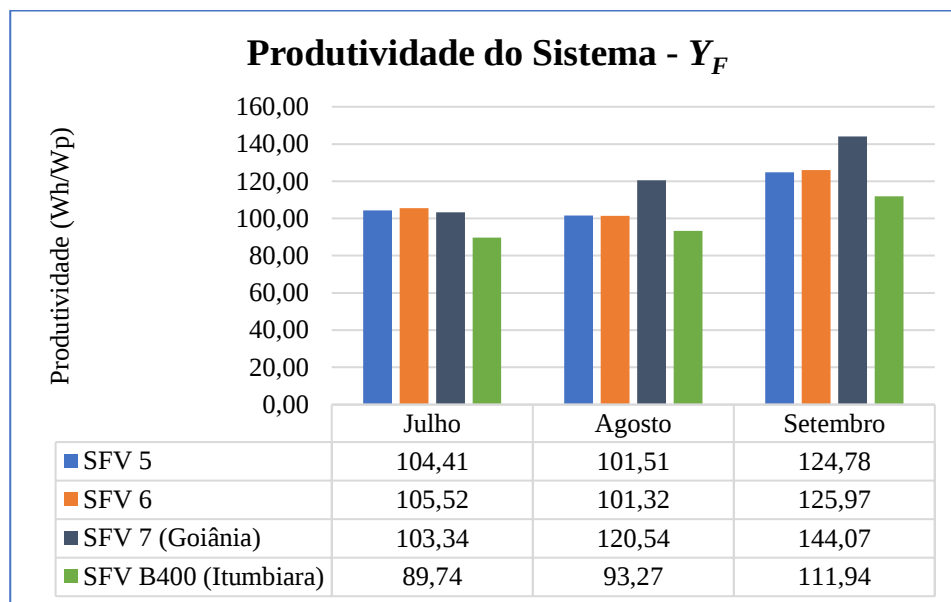


Gráfico 4.11: Produtividade do Sistema dos SFV 5, 6, 7 e B400 do IFG (2021).

A partir do Gráfico 4.11 é possível observar o comportamento distinto dos SFV 5 e 6 com os do SFV 7 e do SFV B400. Os SFV 5 e 6 apresentaram Y_F semelhantes nos 3 meses analisados, com ligeira redução deste índice em agosto (inferior a 5 Wh/Wp) e notável aumento em setembro (superior a 25 Wh/Wp). A maior diferença de Produtividade do Sistema entre os dois sistemas é indentificado em setembro, com 1,19 Wh/Wp.

O SFV 7 apresenta resultados com aumentos expressivos de Produtividade do Sistema, com elevação de 17,2 Wh/Wp de agosto em relação a julho e de 23,53 Wh/Wp de setembro em relação a agosto, totalizando um acréscimo de 40,73 Wh/Wp.

O SFV B400 apresenta aumento sutil e contínuo do Y_F , com resultados menores que os demais sistemas fotovoltaicos em todo o período analisado. Em julho, este SFV apresenta resultados mais próximos aos dos SFV's de Goiânia, com variação inferior a 15,78 Wh/Wp, enquanto em setembro apresenta variação superior a 12,84 Wh/Wp.

O Gráfico 4.12 apresenta o Desempenho Global dos quatro SFV's do IFG.

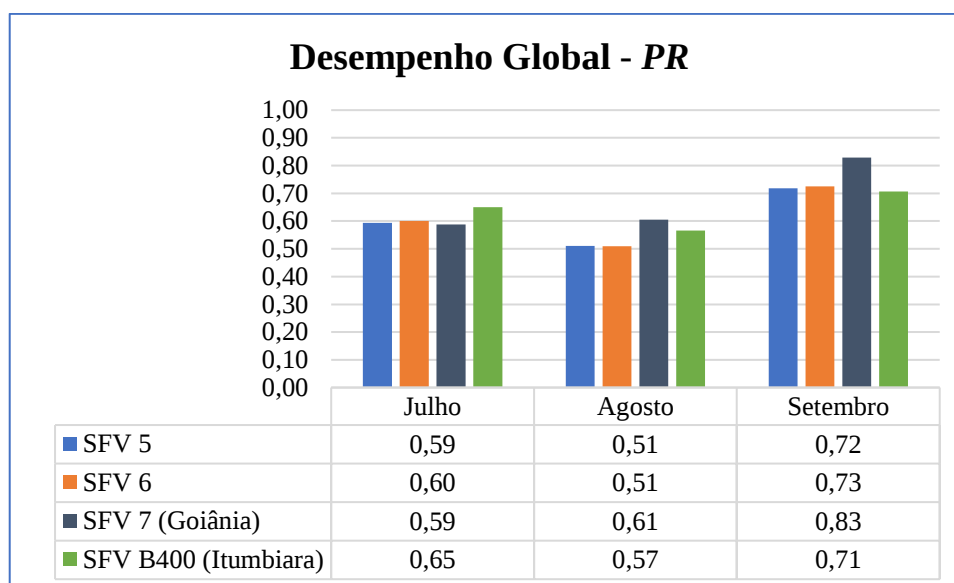


Gráfico 4.12: Desempenho Global dos SFV 5, 6, 7 e B400 do IFG (2021).

O índice *PR* é obtido pela razão da Produtividade do Sistema e da Produtividade de Referência. Para o desenvolvimento desse gráfico, são utilizados os dados de geração já mencionados no tópico 4.2.3 e os dados de Y_R , obtidos a partir da radiação mensal adquiridos do CRECESB. A escolha dos dados dessa fonte deve-se ao fornecimento de valores de radiações mensais específicos de determinada localidade e apresenta as opções de radiação no plano inclinado ou horizontal.

Para o cálculo do Desempenho Global *PR* dos SFV's do Câmpus Goiânia, é utilizado os dados de radiação no plano inclinado e para o SFV do Câmpus Itumbiara, os dados de radiação no plano horizontal, aplicando deste modo, os valores de radiação mais apropriados para a inclinação dos painéis de cada sistema fotovoltaico.

A análise do Gráfico 4.12 permite concluir que o comportamento entre os SFV 5 e 6, SFV 7 e SFV B400 é distinto durante os 3 meses analisados. Constata-se que os SFV 5 e 6, localizados sobre o mesmo bloco de edifícios (Bloco 300) não obtiveram variações expressivas entre seus resultados de julho a setembro, tornando possível considerar que ambos apresentaram o mesmo desempenho. O SFV 7 apresenta o melhor desempenho em relação aos demais sistemas fotovoltaicos em agosto e setembro.

O SFV B400 apresenta o maior *PR* em julho em relação aos demais, seguido de sutil redução em agosto (o qual mantém *PR* superior aos SFV 5 e 6) e tem elevação em setembro, mês no qual atinge uma performance similar ao dos SFV 5 e 6 e inferior ao do SFV 7.

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Os resultados alcançados neste capítulo podem ser visualizados na tabela comparativa abaixo.

Tabela 4.1: Resumo da geração de energia e dos índices de mérito dos sistemas fotovoltaicos do IFG

Câmpus	Sistema	Período (2021)	Geração de energia (kWh)	Fator de Capacidade – FC (%)	Produtividade final – Y_F (Wh/Wp)	Desempenho Global – PR (adimensional)
Aparecida de Goiânia	<i>String</i> arrefecida	23 de janeiro à 05 de fevereiro	181,44	18,46	62,03	0,77
	<i>String</i> não arrefecida	23 de janeiro à 05 de fevereiro	171,06	17,40	58,48	0,73
Goiânia	SFV 5	Julho	3868,46	14,03	104,41	0,59
		Agosto	3760,77	13,64	101,51	0,51
		Setembro	4623,22	17,33	124,78	0,72
	SFV 6	Julho	3909,59	14,18	105,52	0,60
		Agosto	3753,95	13,62	101,32	0,51
		Setembro	4667,33	17,50	125,97	0,73
	SFV 7	Julho	3123,57	13,89	103,34	0,59
		Agosto	3643,40	16,20	120,54	0,61
		Setembro	4354,38	20,01	144,07	0,83
Itumbiara	SFV B400	Julho	2064,00	12,06	89,74	0,65
		Agosto	2145,30	12,54	93,27	0,57
		Setembro	2574,60	15,55	111,94	0,71

Em síntese, conclui-se que para os sistemas fotovoltaicos analisados, o melhor desempenho diante os ambientes selecionados é o do SFV 7, o qual tem a mesma inclinação com a latitude, passou por um processo de limpeza por serviço especializado e esteve atuando em uma estação do ano com incidência de radiação quase ininterrupta durante os dias.

5 CAPÍTULO V – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como grande desafio as aquisições dos dados de geração de energia elétrica e de radiação solar diária para aplicação nos índices de mérito propostos pela IEC16724. A dificuldade de obtenção desses elementos deveu-se ao recente início de operação das usinas solares nos três Câmpus do IFG abordados e a inexistência de banco de dados com dados diários de radiação solar (sendo necessário efetuar o devido tratamento dos dados horários e de unidade de medida), tornando os resultados desta pesquisa informações pioneiras quanto ao desempenho de sistemas fotovoltaicos instalados na instituição.

Conclui-se, no Estudo de Caso I, que o arrefecimento da *string* superior apresentou melhor desempenho, porém não expressivo, em todos os quesitos avaliados em relação a *string* inferior. A pesquisa foi realizada na estação do Verão, caracterizada pela presença de precipitações, o que pode ter contribuído para o arrefecimento não desejado da *string* inferior.

Conclui-se, no Estudo de Caso II, que no mês de setembro encontram-se os melhores resultados. Isso deve-se a maior quantidade de radiação incidente proporcionada pela atmosfera mais limpa (embora com nebulosidades temporárias), arrefecimento e limpeza por ação das precipitações e maior tempo de exposição à radiação solar, promovida pelo aumento na quantidade de horas diárias com presença do Sol, característico do fim da estação do Inverno e início da Primavera.

O sistema fotovoltaico com os melhores índices de mérito foi o SFV 7, uma vez que apresenta resultados de Fator de Capacidade, Produtividade do Sistema e Desempenho Global semelhantes ao dos demais sistemas analisados no mês de julho e resultados superiores a esses mesmos sistemas fotovoltaicos, nos meses de agosto e setembro. Dentre os fatores que permitiram seu melhor desempenho, evidencia-se a limpeza de seus painéis realizada por um serviço especializado, em um período do ano com condições atmosféricas caracterizadas por fumaça, fuligem e demais impurezas atmosféricas.

O sistema fotovoltaico com o segundo melhor Desempenho Global foi o SFV B400, o qual é caracterizado por ter inclinação dos painéis quase plana.

A comparação de dois sistemas fotovoltaicos, SFV 5 e 6, com a mesma configuração operacional e localizados no mesmo local, demonstra que há sutis variações de performance devido as características inerentes de cada sistema.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Com a pretensão de explorar o assunto abordado neste trabalho, que tem como foco o desempenho dos sistemas fotovoltaicos nos Câmpus do IFG, propõem-se que novos trabalhos sejam realizados com o objetivo de:

- aplicar a metodologia para os mesmos sistemas fotovoltaicos analisados com os dados de outras estações do ano (primavera, verão, outono);
- aplicar a metodologia para outros sistemas fotovoltaicos do IFG no mesmo período analisado nesta pesquisa;
- desenvolver estudos sobre a geração de energia fotovoltaica anual;
- realizar estudos sobre os índices de mérito anual;
- realizar pesquisas sobre o Desempenho Global com outros bancos de dados de radiação solar.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADARAMOLA, M. S; VAGNES, E. E. T. Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions. **Energy conversion and management**, Elsevier, v. 90, n.15, p.458-46, jan. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890414009856>. Acesso em: 12 jul. de 2021.

ALMEIDA, M. P., ZILLES, R. Cálculo de parâmetros de desempenho para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. **Revista Brasileira de Energia Solar**, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 70-77, jul. 2012. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/167/156>. Acesso em: janeiro de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10899: Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro, p.11, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Projeto de Lei nº5829/2019**. 2021. Disponível em: file:///C:/Users/rafae/Downloads/DOC_PARTICIPANTE_EVT_6961_1629147241674_KComissaoPermanenteCDR20210816EVT007_parte13047_RESULTADO_1629147241674.pdf. Acesso em: 18 jan. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Energia solar fotovoltaica no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: janeiro de 2022.

BENEDITO, Ricardo da Silva. **Caracterização Da Geração Distribuída De Eletricidade Por Meio De Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede, No Brasil, Sob Os Aspectos Técnicos, Econômico E Regulatório**. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BRASIL. **Lei nº14300**, de 06 de janeiro de 2022. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5ed. 4f. 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>. Acesso em: 14 jan. 2022.

BRASIL, Ministério De Minas E Energia. **Sancionada lei que institui marco legal da geração distribuída**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/sancionada-lei-que-institui-marco-legal-da-geracao-distribuida>. Acesso em: 14 jan. 2022.

BRASIL, Ministério Do Meio Ambiente. **Com meta ambiciosa, Brasil anuncia redução de 50% nas emissões de carbono até 2030**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/anuncio-de-ampliacao-da-meta-de-reducao-de-emissoes-para-50-ate-2030-e-destaque-nas-primeiras-participacoes-do-brasil-na-cop26>. Acesso em: 14 jan. 2022.

BRASIL **Resolução Normativa Aneel nº 954**, de 30 de novembro de 2021. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 228ed. 57f. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-954-de-30-de-novembro-de-2021-364715864>. Acesso em: 14 jan. de 2022.

BUENO, A. F. M.; BRANDÃO, C.A.L. **Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil**. Belo Horizonte, MG, 2016. Disponível em: http://abaque.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Estudo_Mercado_Armazenamento_Brasil.pdf . Acesso em: 18 out. 2021.

CENTRO DE REFERÊNCIAS PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO. **Radiação Solar**. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301. Acesso em: janeiro de 2022.

CIDADE-BRASIL. **Município de Aparecida de Goiânia**. 2021. Disponível em: <https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-itumbiara.html>. Acesso em: 21 dez. 2021.

CIDADE-BRASIL. **Município de Goiânia**. 2021. Disponível em: <https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-itumbiara.html>. Acesso em: 21 dez. 2021.

CIDADE-BRASIL. **Município de Itumbiara**. 2021. Disponível em: <https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-itumbiara.html>. Acesso em: 21 dez. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2021**. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2021.pdf. Acesso em: 13 jan. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz energética e elétrica**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 13 jan. de 2022.

FUSANO, Renato Hideo. **Análise Dos Índices De Mérito Do Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Do Escritório Verde Da UTFPR**. 2013. 94 f. TCC (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

HENG, Z.; MINGJIE, L.; HAIPING, C.; CHENTAO, Y. Experimental study of constant temperature operation and constant flow operation in concentrating PV/T system. **Energy Procedia**, vol. 105, p. 869-874, 2017.

KHALID, A. M.; MITRA, I.; WARMUTH, W.; SCHACHT, V. Performance ratio: Crucial parameters for grid connected PV plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1139-1158, 2016.

KROSNHAK, Larissa Barbosa *et al.* Estudo do potencial da microgeração e minigeração fotovoltaica a partir dos SFVCR instalados na UTFPR-Câmpus Curitiba. **Smart Energy Paraná 2018**, Curitiba, 2018. Disponível em: <http://utfpr-ct-static-content.s3.amazonaws.com/labens.ct.utfpr.edu.br/wp-content/uploads/2018/11/SILVEIRA-et-al-Artigo-Completo-Smart-Energy-2018-.pdf>. Acesso em: 10 jan. de 2022.

KROTH, Geóvio. **Análise de indicadores de desempenho e de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico com distintos fatores de dimensionamento de inversor**. 2021. Monografia (Especialização) – Pós-graduação em energia e sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2021. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/226946/PGES0030-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 jan. 2022.

IEC STANDARD 61724. **Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis**. 1998.

LIMA, L. C. *et al.* Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. **Energy for sustainable development**, Fortaleza, v. 37. p.79-85, abril 2017. Disponível em: <http://pendidikankimia.walisongo.ac.id/wp-content/uploads/2018/09/8-vol-37-april-2017.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2021.

LUCIANO, A. C. dos S. **Modelagem da distribuição da radiação solar incidente na superfície do terreno a partir de dados SRTM**. 2015. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

MACHADO, Gilson Mario Vieira *et al.* Estudo de caso de um sistema fotovoltaico instalado no Campus da Unicamp em diferentes softwares de simulação. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.11, n. 2, Fortaleza, 2020.

MARION, B. *et al.* Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. **IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition**, Springfield, 2005. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1488451>. Acesso em: 15 jul. 2021.

MENDES, B. E. S. **Projeto e implantação de sistema de arrefecimento para melhoria da eficiência energética de um sistema de geração fotovoltaica com supervisão online**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Goiás, Goiânia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/859>. Acesso em: 01 jul. 2021

MELLO, A. D. **Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede a partir da determinação de índices de mérito**. 2016. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/164812/TCC%20-%20Vers%c3%a3o%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 jun. de 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Evolução da capacidade instalada no SIN**. 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 14 jan. 2022.

PINHEIRO, E. *et al.* Avaliação do potencial da geração fotovoltaica em diferentes condições climáticas na matriz elétrica brasileira. **V Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Recife, 2014. Disponível em: <https://docplayer.com.br/36565037-Avaliacao-do-potencial-da-geracao-fotovoltaica-em-diferentes-condicoes-climaticas-na-matriz-eletrica-brasileira.html>. Acesso em: 06 jan. de 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo de Características Elétricas e Térmicas de Inversores Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2010. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em:

<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/27935/000764646.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 maio 2021

RAMPINELLI, Giuliano Arns *et al.* Desenvolvimento de mapas de avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos em diferentes ângulos de inclinação e de azimute. **Avances em Energias Renovables y Media Ambiente**, v. 18, p.04.01-04.08, 2014. Disponível em: https://nteelsolar.paginas.ufsc.br/files/2020/10/2014_L.-Kormann-J.-Peroza-J.-E.-Silva-G.-A.-Rampinelli-2014-Tema-4.pdf . Acesso em: 13 jan. de 2022.

RENEWABLES 21. **Global Status Report**. 2021ed. 117f. Paris, 2021. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf. Acesso em 13 jan. 2022.

SGANZERLA, Lucas Marino Bianchessi. **Análise dos índices de mérito de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em Curitiba**. 2018. Monografia (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/18583/1/CT_CEER_IV_2018_08.pdf. Acesso: 01 jul. de 2021.

SILVA, J. A. A. **Tratamento de dados meteorológicos e análise de desempenho do sistema fotovoltaico da EMC/UFG**. 2019. 35f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

SILVA, S. B. *et al.* Análise de desempenho de diferentes sistemas fotovoltaicos conectados à rede em operação na cidade de Itumbiara, Goiás. **NUPSOL**. Itumbiara, 2016. Disponível em: https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2016/ceel2016_artigo109_r01.pdf. Acesso em: 12 maio 2021.

SUNRISE-AND-SUNSET. **Nascer e pôr do sol Goiânia, Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.sunrise-and-sunset.com/pt/sun/brasil/goiania>. Acesso em: 16 jan. 2022.

SMA, Solar Technology AG. **Performance ratio: Quality factor for the PV plant**. 2010. Disponível em: <https://files.sma.de/downloads/Perfratio-TI-en-11.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2022.

YANG, Renata Lautert. **Estimação da taxa de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede com diferentes tecnologias no estado do paraná**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/23645/1/taxadesempenhosistemasfotovoltaicos.pdf> . Acesso em: 13 jun. 2021.