

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VINICIUS SILVA MARQUETTE

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADO À REDE COM BASE EM ÍNDICES DE MÉRITO**

ITUMBIARA - GO

2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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: Vinícius Silva Marquette.

Matrícula: 20121040070261.

Título do Trabalho: Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede com base em índices de mérito.

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.

Itumbiara-GO, 30/04/2025.

Local Data



Documento assinado digitalmente

VINICIUS SILVA MARQUETTE

Data: 30/04/2025 16:10:12-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

VINICIUS SILVA MARQUETTE

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADO À REDE COM BASE EM ÍNDICES DE MÉRITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Itumbiara, como parte dos requisitos para a conclusão do Curso de Engenharia Elétrica e obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: 3.04.04.00-2 - Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Victor Régis Bernadeli

ITUMBIARA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M297a Marquette, Vinicius Silva

Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede com base em índices de mérito. / Vinicius Silva Marquette. -- Itumbiara, 2025.

77 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Victor Régis Bernadeli.

1.Energia solar 2. Sistemas de energia fotovoltaica. 3. Sistemas de energia elétrica. I. Título. II. Marquette, Vinicius Silva IV. Bernardelli, Victor Régis. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.319

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Marla de Souza Correia CRB-1/3011



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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

Termo de Aprovação

Vinicius Silva Marquette

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAÍCOS CONECTADOS À REDE COM BASE EM ÍNDICES DE MÉRITO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 20 de Fevereiro de 2025, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. MSc. Thaissa Melo César - Membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Hugo Xavier Rocha - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Itumbiara – GO

2025

Documento assinado eletronicamente por:

- **Thaissa de Melo Cesar**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/02/2025 14:09:14.
- **Hugo Xavier Rocha**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/02/2025 22:34:18.
- **Victor Regis Bernardeli**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/02/2025 17:37:42.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/02/2025. 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: 620537

Código de Autenticação: e4c0bdf13c



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Avenida Furnas, nº 55, None, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre estar sendo a base de todas as minhas conquistas.

Aos meus pais Divina Márcia da Silva e Frank Marquette Durães, hoje falecido, porém, a pouco tempo, por sempre estarem ao meu lado me apoiando, dando forças para nunca desistir em todas decisões que tenho tomado.

À minha noiva Darkiara Santiago Feitosa, por toda dedicação e sabedoria oferecida, por todo companheirismo em momentos de estudo em casa e pela sua compreensão em momentos de ausência.

Aos meus amigos e colegas que fiz no Câmpus durante todo período que estava em formação, amigos e colegas estes que foram de grande importância no decorrer dos estudos, onde formávamos grupos de estudos na biblioteca após o fim das aulas para tirar dúvidas e estudar um pouco mais para aprofundar o conhecimento já adquirido em sala de aula e fazer exercícios, nos preparando para as provas.

Ao meu tio Miller Marquette Durães que por diversas vezes era ele a quem eu recorria para poder pegar carona, nos dias de muito sol e principalmente nos dias chuvosos, pois na época que iniciei os estudos eu ainda não tinha nenhum meio de transporte para ir ao Câmpus a não ser que eu fosse a pé.

Ao meu orientador Prof. Dr. Victor Régis Bernadeli, por todo apoio e auxílio fornecido, orientando no desenvolvimento deste trabalho quanto também no período de estágio no laboratório do Câmpus.

Ao Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara pela cessão dos laboratórios do Câmpus, quanto aos professores e ao corpo de funcionários, principalmente aos que me deram apoio e auxílio quando possível e sempre que foi necessário, também a oportunidade de ser estagiário.

*“O dinheiro faz homens ricos, o
conhecimento faz homens sábios e
a humildade faz grandes homens.”.*
(Mahatma Gandhi)

RESUMO

A geração de energia através das fontes renováveis de energia (FRE) tem ganhado importante destaque no mundo, países desenvolvidos, como EUA, Alemanha, Japão e Itália, como nos países em desenvolvimento, como China, México, Índia, e Brasil. As FRE já se constituem uma alternativa capaz de gerar eletricidade sem agredir o meio ambiente.

Entre as FRE's, a fonte solar vem ganhando cada vez mais destaque. O desenvolvimento da tecnologia solar fotovoltaica a qual consiste na conversão direta da luz solar em energia elétrica, diferentemente dos sistemas solares térmicos, que são empregados para realizar aquecimento, tem tornado a cada vez, mais presente no meio urbano.

Diante desse contexto, com a tecnologia modernizada presente nos equipamentos de geração de energia renováveis, em especial a energia solar fotovoltaica, permite ter um bom rendimento de produção de energia à longo prazo, em torno de 25 anos, os painéis fotovoltaicos possuem uma estimativa de perda de apenas 20%, ou seja, há uma projeção de 0,75% de perdas de eficiência dos módulos fotovoltaicos por ano. Os fabricantes do mercado trabalham com garantias que atestam que seus módulos permanecerão com mais de 80% da eficiência original ao final de 25 anos.

Apesar dos avanços já alcançados, principalmente no que diz respeito ao custo dos componentes dos SFCR, muitos desafios ainda precisam ser vencidos para que a inserção desta fonte de energia na matriz energética brasileira se torne mais expressiva e mais eficiente. As perdas de eficiência em SFCR geralmente são ocasionadas devido à orientação, inclinação, sombreamento, linha do horizonte, temperatura, incompatibilidade, sujeira, cabos cc, cabos ca e inversor. Diante disso, este trabalho tem como finalidade analisar diferentes sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no tocante ao rendimento da produção de energia bem como os índices de mérito para avaliar o desempenho individual destes SFCR's.

Palavras-Chave: 1. Energia Solar. 2. Sistema Fotovoltaico. 3. Produção de Energia. 4. Eficiência Energética. 5. Índices de Mérito

ABSTRACT

Power generation through renewable sources (FRE) has gained important highlight in the world, both in developed countries, such as the USA, Germany, Japan and Italy, as well as in developing countries, such as China, Mexico, India and Brazil. FRE are already an alternative capable of generating electricity without harming the environment.

Among FRE's, the solar source is gaining more and more prominence. The development of solar photovoltaic technology consists of the direct conversion of sunlight into electrical energy, unlike solar thermal systems, which are used to carry out heating, has become increasingly present in urban environments.

In this context, with the modernized technology presented in renewable energy generation equipment, especially photovoltaic solar energy, it allows for a good energy production yield in the long term, in around 25 years, photovoltaic panels have an estimated loss of only 20%, that is, there is an estimated 0.75% efficiency loss of photovoltaic modules per year. Market manufacturers work with guarantees that their modules will remain at more than 80% of their original efficiency at the end of 25 years.

Despite the advances already made, especially with regard to the cost of the SFCR components, many challenges still need to be overcome so that the inclusion of this energy source in the Brazilian energy matrix becomes more significant and more efficient. Efficiency losses in SFCR are generally caused due to orientation, shading, horizon line, temperature, incompatibility, dirt, dc cables, ac cables and inverter. Therefore, this work aims to specifically analyze different photovoltaic systems connected to the grid, not regarding the energy production yield as well as the merit indices to evaluate the individual performance of the SFCR's.

Keywords: 1. Solar Energy. 2. Photovoltaic System. 3. Energy Production. 4. Energy Efficiency. 5. Merit Index

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de Radiação Solar no Brasil	16
Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira.....	17
Figura 3 - Potência Fotovoltaica instalada no Brasil.....	18
Figura 4 - Potência Instalada no Mundo	19
Figura 5 - Ranking de Estados com maior capacidade instalada de GD no Brasil.....	19
Figura 6 - Variação da Radiação Solar no Brasil.....	23
Figura 7 - Exemplo de SFI suprimindo a demanda elétrica de uma residência.....	24
Figura 8 - Exemplo de SFCR suprimindo a demanda elétrica de uma residência.....	26
Figura 9 - Símbolo que representa um módulo fotovoltaico.....	26
Figura 10 - Associação em série de módulos fotovoltaicos	27
Figura 11 - Associação em paralelo de módulos fotovoltaicos.....	27
Figura 12 - Associação mista de módulos fotovoltaicos.....	28
Figura 13 - Geometria Solar.....	29
Figura 14 - HSP (Horas de Sol Pico)	32
Figura 15 - Incidência solar durante o solstício.....	33
Figura 16 - Incidência solar durante o equinócio.....	33
Figura 17 - Irradiação Solar no Plano Horizontal para o SFCR I	39
Figura 18 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para o SFCR I	39
Figura 19 - Localização SFCR I - Mineiros-GO.....	40
Figura 20 - Módulos - SFCR I - Mineiros-GO.....	40
Figura 21 - Inversor - SFCR I - Mineiros-GO.....	41
Figura 22 - Geração - SFCR I - Mineiros-GO.....	42
Figura 23 - Irradiação Solar no Plano Horizontal para o SFCR II.....	43
Figura 24 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para o SFCR II	43
Figura 25 - Localização SFCR II – Itumbiara-GO.....	44
Figura 26 - Módulos - SFCR II – Itumbiara-GO.....	44
Figura 27 - Inversor - SFCR II – Itumbiara-GO.....	45
Figura 28 – Geração - SFCR II - Itumbiara-GO.....	46
Figura 29 - Irradiação Solar no Plano Horizontal para o SFCR III	47
Figura 30 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para o SFCR III.....	48
Figura 31 - Localização SFCR III - Alto Araguaia - MT.....	48
Figura 32 - Módulos SFCR III - Alto Araguaia - MT.....	49

Figura 33 - Inversor - SFCR III – Alto Araguaia - MT	49
Figura 34 - Geração - SFCR III – Alto Araguaia – MT	50
Figura 35 - PVsyst – SFCR I - Mineiros-GO.....	51
Figura 36 - PVsyst – SFCR I - Mineiros-GO.....	52
Figura 37 - PVsyst – SFCR II - Itumbiara-GO.....	54
Figura 38 - PVsyst – SFCR II - Itumbiara-GO.....	55
Figura 39 - PVsyst – SFCR III - Alto Araguaia - MT.....	57
Figura 40 - PVsyst – SFCR III - Alto Araguaia - MT.....	58
Figura 41 – Geração em kWh – (SFCR’s – 2023)	61
Figura 42 – Performance Ratio – (SFCR’s – 2023)	61

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Dados dos Módulos – SFCR I.....	41
Tabela II – Dados do Inversor – SFCR I	41
Tabela III – Geração Mensal - SFCR I	42
Tabela IV – Dados dos Módulos – SFCR II.....	45
Tabela V – Dados do Inversor – SFCR II	45
Tabela VI – Geração Mensal - SFCR II	46
Tabela VII – Dados dos Módulos – SFCR III.....	49
Tabela VIII – Dados dos Inversor – SFCR III.....	50
Tabela IX – Geração Mensal - SFCR III	50
Tabela X – Indicadores – SFCR's.....	60
Tabela XI – Índice de Produção de Referência - (YR).....	62
Tabela XII - Índice de Produção do campo Fotovoltaico - (YA).....	63
Tabela XIII – Geração Real x Geração PVsyst.....	63
Tabela XIV - Produtividade Anual - (YF).....	64
Tabela XV - Perdas no campo fotovoltaico – LC.....	65
Tabela XVI - Perdas no restante do sistema – LS.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FC	Fator de Capacidade
FRE	Fontes Renováveis de Energia
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
GW	Giga Watt
kWh	Quilo Watt Hora
kWp	Quilo Watt Pico
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MWh	Mega Watt Hora
PR	Desempenho Global
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
REN	Resolução Normativa
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFV	Sistema Fotovoltaico
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
STC	Standard Testing Conditions
YF	Produtividade Anual
YR	Produtividade de Referência

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	15
INTRODUÇÃO.....	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
CAPÍTULO 2.....	22
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
2.2 ENERGIA SOLAR.....	22
2.3 ENERGIA FOTOVOLTAICA - FV.....	23
2.3.1 SISTEMA AUTÔNOMO OU ISOLADO (<i>OFF GRID</i>).....	24
2.3.2 SISTEMA CONECTADO À REDE (<i>ON GRID</i>).....	25
2.4 ASSOCIAÇÃO DOS MÓDULOS.....	26
2.4.1 ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE.....	26
2.4.2 ASSOCIAÇÃO EM PARALELA.....	27
2.4.3 ASSOCIAÇÃO MISTA.....	28
2.5 ÂNGULOS.....	29
2.5.1 ÂNGULO DE AZIMUTE E INCLINAÇÃO.....	30
2.6 SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS.....	32
2.7 ÍNDICES DE MÉRITOS.....	34
2.7.1 FATOR DE CAPACIDADE – (FC)	34
2.7.2 PRODUTIVIDADE ANUAL – (YF)	35
2.7.3 RAZÃO DE PERFORMANCE – (PR)	36
CAPÍTULO 3.....	38
SISTEMAS ANALISADOS.....	38
3.1 SFCR I.....	38
3.1.1 LOCALIZAÇÃO – SFCR I	38
3.1.2 DESCRIÇÃO – SFCR I	40
3.2 SFCR II	43
3.2.1 LOCALIZAÇÃO – SFCR II	43
3.2.2 DESCRIÇÃO – SFCR II	44
3.3 SFCR III	47
3.3.1 LOCALIZAÇÃO – SFCR III	47

3.3.2 DESCRIÇÃO – SFCR III	48
CAPÍTULO 4.....	51
RESULTADOS.....	51
4.1 SIMULAÇÕES NO PVSYSY.....	51
4.1.1 PV SYST – SFCR I.....	51
4.1.1.1 SFCR I – ÍNDICE DE MÉRITO – FC.....	52
4.1.1.2 SFCR I – ÍNDICE DE MÉRITO – YF.....	53
4.1.1.3 SFCR I – ÍNDICE DE MÉRITO – PR.....	53
4.1.2 PV SYST – SFCR II.....	54
4.1.2.1 SFCR II – ÍNDICE DE MÉRITO – FC.....	55
4.1.2.2 SFCR II – ÍNDICE DE MÉRITO – YF.....	56
4.1.2.3 SFCR II – ÍNDICE DE MÉRITO – PR.....	56
4.1.3 PV SYST – SFCR III.....	57
4.1.3.1 SFCR III – ÍNDICE DE MÉRITO – FC.....	58
4.1.3.2 SFCR III – ÍNDICE DE MÉRITO – YF.....	59
4.1.3.3 SFCR III – ÍNDICE DE MÉRITO – PR.....	59
4.2 COMPARATIVO DOS ÍNDICES DE MÉRITO DOS SISTEMAS ANALISADOS E OUTROS INDICADORES.....	60
4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS.....	66
CAPÍTULO 5.....	67
CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A busca por fontes alternativas de energia tornou-se uma necessidade a nível mundial. O consumo de energia em larga escala que vem alavancado a cada ano, faz com que novos meios de geração sejam explorados, de forma que haja uma redução do consumo a partir das fontes tradicionais. Com isso, as formas de geração limpas e renováveis surgem como uma excelente opção nesse contexto.

Partindo de tal pressuposto, insere-se a energia Solar Fotovoltaica (SFV), que possui inúmeros benefícios, especialmente ambientais, quando comparado a outras formas de geração, por se tratar de uma energia oriunda dos raios solares. Outros pontos positivos a serem destacados em novas esferas são: redução de gastos com energia elétrica, geração de empregos, diversificação da matriz energética mundial, redução de investimentos em geração e distribuição, entre outros.

Entretanto, sabe-se que as tradicionais fontes de energia ainda constituem a base mundial da geração de eletricidade – como as usinas hidrelétricas, termelétricas a carvão e petróleo e as usinas nucleares [1], contudo, os investimentos nas fontes renováveis (especialmente na SFV) vêm crescendo gradativamente ao longo dos últimos anos, aumentando a confiabilidade nessas tecnologias, reduzindo custos e aumentando a demanda onde os recursos naturais em vários locais do mundo são favoráveis para implantação.

Com isso, nos últimos anos o Brasil vem discutindo formas de crescimento dessa tecnologia, buscando aumentar os investimentos nesse setor, seja por incentivos fiscais do governo a nível federal e estadual, ou abrindo novas oportunidades para empreendedores e consumidores que desejam investir nessa tecnologia que aumenta exponencialmente a cada dia, e tende a se tornar figura constante na matriz energética brasileira.

Outro ponto a ser destacado, é que de acordo com [2], a irradiação solar média no Brasil pode atingir 2400 kWh/m²/ano em determinadas regiões do país, valores muito acima se comparado a países como Alemanha (entre 900 e 1250 kWh/m²/ano) e França (900 e 1650 kWh/m²/ano), que são potências na energia SFV, fato que coloca o Brasil em vantagem sobre grande parte do mundo. Na Figura 1 podemos observar os níveis de radiação no país.

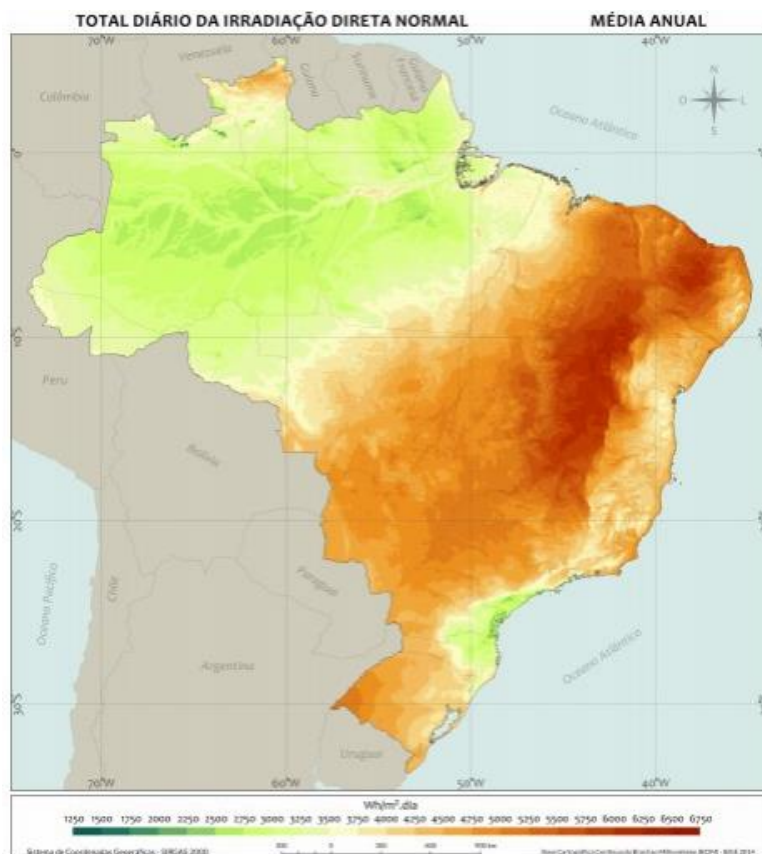


Figura 1 – Mapa de Radiação Solar no Brasil

Fonte: [2]

Como pode ser visto, a região que apresenta os maiores índices de radiação é o Nordeste, seguida do Centro-Oeste, enquanto as menores taxas estão na região Norte, ainda que superiores à média de vários países.

De acordo com [3], pode-se observar na figura 2 a seguir, que a fonte solar ultrapassou a fonte eólica em capacidade instalada no Brasil e tornou-se a segunda maior em potência acumulada na matriz elétrica brasileira, representando 15,8% (34.853 MW) de toda a capacidade de geração do país.

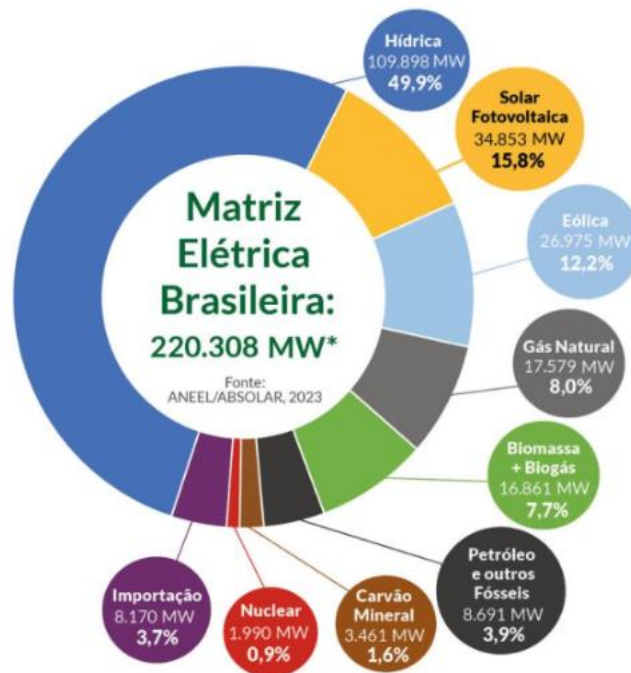


Figura 2: Matriz Elétrica Brasileira em 2023

Fonte: [3]

Contudo, vale ressaltar que o valor de 10,1 GW refere-se apenas à geração centralizada (GC) de usinas de grande porte, que fornecem energia para distribuidoras e grandes consumidores do Mercado Livre, enquanto 24,7 GW referem-se à micro e mini geração distribuída (GD), meios de geração que serão conceituados posteriormente.

A energia SFV vem crescendo gradativamente ao longo dos últimos anos, prova disso (vide Figura 3) é o salto a partir do ano de 2016/2017, onde o país tinha apenas 1.158 MW de potência instalada e em 2022 atingiu a marca de 15.310 MW, um aumento superior a 1000%.

Evolução no Brasil

Solar fotovoltaica em potência instalada (MW)

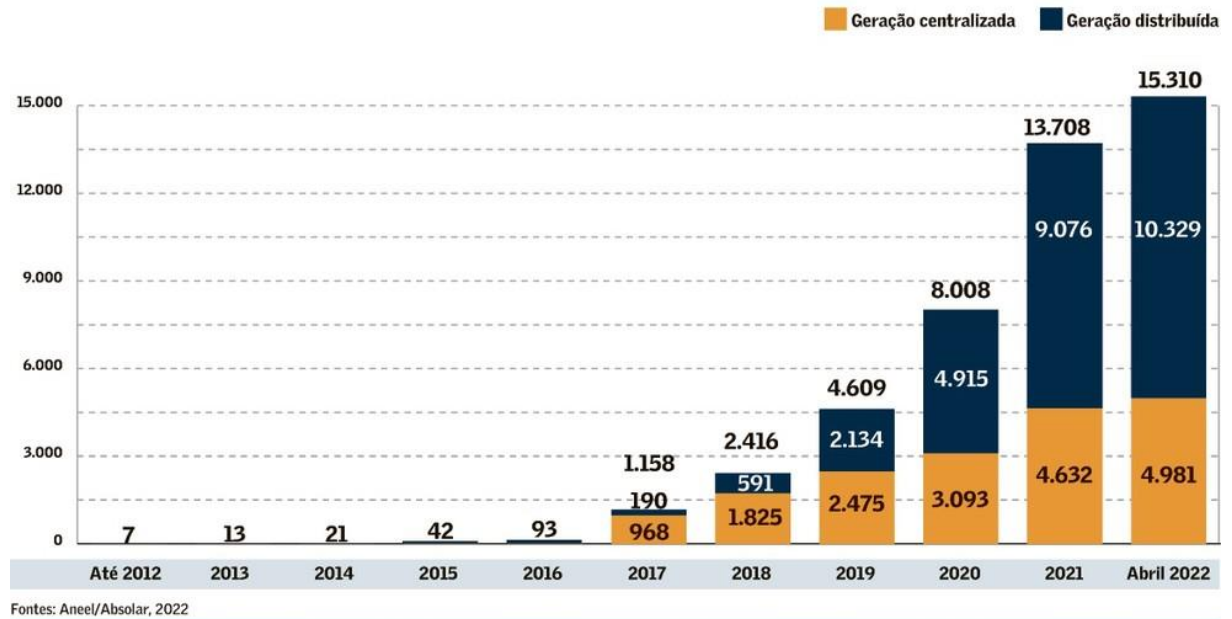


Figura 3: Potência Fotovoltaica instalada no Brasil

Fonte: [3]

Esse elevado crescimento deu-se a partir do ano de 2016, com a Resolução Normativa (REN) N° 482, atualizada em 2015 para a REN N° 687, e a Lei 13.169/2015, que criou benefícios para empreendedores e consumidores investirem nesse meio de geração de energia. Tais resoluções e leis também serão conceituadas em capítulos posteriores.

Analisando a nível mundial, a energia SFV também segue em constante crescimento ao longo dos últimos anos. Observando a Figura 4, pode-se notar que a China lidera o ranking de potência instalada, seguido por países como, Japão, Alemanha e Estados Unidos.

Aumento vertiginoso

Capacidade global de energia solar instalada 2002-2021 (em GW)

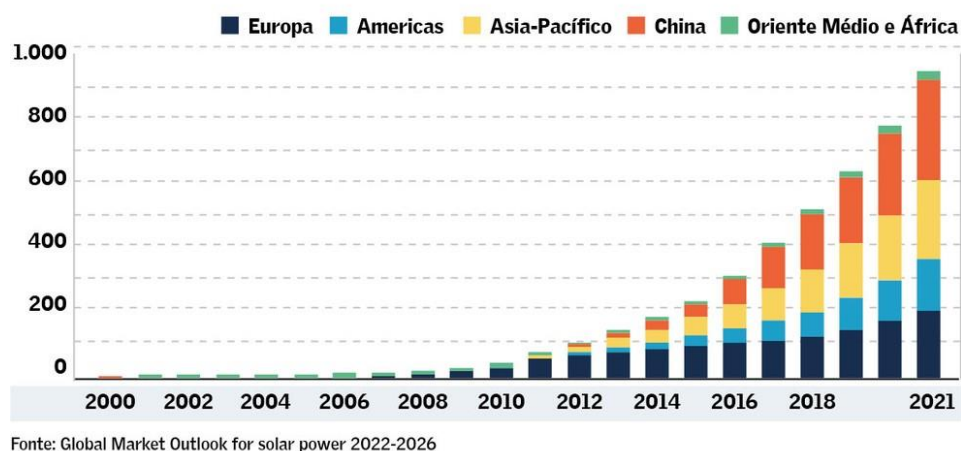


Figura 4: Potência Instalada no Mundo

Fonte: [4]

Como pode ser visto na figura acima, a potência instalada globalmente teve um incremento de aproximadamente 1000 GW em um intervalo de 10 anos, evidenciando o progresso dessa tecnologia ao longo dos últimos anos, principalmente nas grandes potências mundiais.



Figura 5: Ranking de Estados com maior capacidade instalada de GD no Brasil

Fonte: [5]

A Figura 5 mostra o panorama brasileiro da GD conectada à rede. Nela, é possível perceber que os maiores números de conexões estão nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul, de acordo com dados da ANEEL e ABSOLAR. Isso se deve principalmente a incentivos governamentais e ao pioneirismo desses estados na conexão de sistemas de geração distribuída à rede elétrica. Vale ressaltar que o primeiro sistema foi conectado à rede em Minas Gerais, em 2012. Contam com 2.390,8 MW, 2.332,2 MW e 1.929,6 MW de potência acumulada instalada até fevereiro de 2023, respectivamente. Estes valores correspondem a 13,9%, 13,5% e 11,2% do total, e juntos perfazem 37% da GD solar no Brasil. O Paraná, Mato Grosso, Santa Catarina, Bahia, Goiás, Rio de Janeiro e Mato Grosso do Sul completam o top 10 atual de estados. Cabe notar que, mesmo em conjunto, estes estados têm menor potência instalada que os três primeiros estados, representando 36% do total. [5]

Apesar do estado de Goiás ainda estar bem atrás de estados como Minas Gerais e Rio Grande do Sul, tem-se uma expectativa de que o número de instalações cresça assim como em todo o território nacional, seja por incentivos fiscais, preocupação ambiental, economia para a população ou devido à queda nos custos dos equipamentos e instalações.

Diante do contexto apresentado, a proposta de trabalho de conclusão de curso é realizar um estudo sobre o desempenho de 3 sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados em diferentes pontos do território nacional e com irradiações solares distintas.

Segundo [6], sabe-se que para maximização da geração é necessário que os módulos estejam orientados para a linha do equador, isto é, para o Norte Geográfico em sistemas instalados no Hemisfério Sul, e apresentem um ângulo de inclinação igual ou próximo a latitude local. Contudo, a maioria dos telhados onde um determinado sistema será instalado não permite a execução desse cenário ideal, fazendo com que muitas vezes o cliente tenha gastos extras com sistemas de suporte, para permitir que o ângulo de azimute seja igual a 0°, que é utilizado como referência para o Norte Geográfico.

Com isso, esse trabalho foi dividido em 4 importantes etapas: a primeira foi utilizar três sistemas para análises onde estão instalados em diferentes localidades nos estados de Goiás e Mato Grosso. Posteriormente, a segunda etapa foi colher todos os dados de relevância de cada sistema analisado, tais como radiação, temperatura e principalmente a produção de energia, dados estes disponibilizados por plataformas de monitoramento *online* da WEG e GROWATT (fabricantes dos inversores).

A terceira etapa constituiu nos cálculos dos índices de mérito de cada sistema analisado, a partir dos dados coletados ao longo do período analisado, os quais permitem realizar

comparações entre distintos SFCR's. Por último, a quarta etapa, compreende-se a utilização de tabelas comparativas a fim de apresentar os resultados obtidos, informando os parâmetros dos índices de mérito, evidenciando o melhor desempenho dentre os SFCR's avaliados.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução;
- Capítulo 2 – Fundamentação Teórica;
- Capítulo 3 – Sistemas Analisados;
- Capítulo 4 – Resultados;
- Capítulo 5 - Considerações Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros;
- Referências;
- Anexo 1 – *Datasheet* dos módulos;
- Anexo 2 – *Datasheet* dos inversores.

O **capítulo 2** descreve detalhadamente à cerca do SFCR, apresentando todos os conceitos necessários para compreensão do trabalho, tais como radiação e irradiação, explicação da geometria solar, evidenciando principalmente os ângulos de azimute e inclinação, assim como a diferenciação dos tipos de gerações (GC, GD). Posteriormente haverá a conceituação dos índices de mérito, seguido pela explicação de fenômenos naturais como Solstício e Equinócio.

O **capítulo 3** apresenta os sistemas analisados, fornecendo dados tais como, potência, geração, módulos, inversores e principalmente enfatiza as variáveis que compõem os índices de méritos. Posteriormente será fornecido informações referentes aos locais de instalação, tais como latitude e longitude os quais serão fundamentais na apresentação dos resultados.

O **capítulo 4** apresenta os resultados obtidos ao longo do período analisado, dando ênfase para os índices de méritos obtidos por cada sistema e principalmente a geração de energia, evidenciando os parâmetros de desempenho individual.

O **capítulo 5** apresenta as considerações finais sobre o trabalho, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros, com base nos resultados obtidos.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo tem como objetivo descrever sucintamente à cerca do SFCR, apresentando todos os conceitos necessário para compreensão do trabalho, como radiação/irradiação, explicação da geometria solar, evidenciando principalmente os ângulos de azimute e inclinação solar. Posteriormente, haverá a conceituação dos índices de mérito, seguido pela explicação de fenômenos naturais como Solstício e Equinócio, além da diferenciação entre SI (sistema isolado) e SFCR. Ao decorrer do capítulo será apresentado as influências geradas pelas REN e leis que influenciaram diretamente no crescimento de tal tecnologia no país.

2.2 ENERGIA SOLAR

A energia solar ou fotovoltaica é a energia produzida a partir da luz solar que chega à Terra através de duas formas: térmica e luminosa. Pode-se dizer que é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, a partir do efeito fotovoltaico. Segundo [7] a Terra recebe, anualmente, energia solar correspondente a 72 mil vezes o consumo energético mundial. Além disso, a maior parte do território brasileiro está localizada próxima à linha do equador, o que implica em dias com maior quantidade de horas de radiação solar [7]. Contudo, vale ressaltar que a energia solar não chega de forma igual para todos os lugares do mundo, dependendo de alguns fatores como: clima, estações do ano e principalmente irradiância solar.

O Brasil é um país privilegiado por receber um alto índice de radiação solar. Na região do semiárido estão os melhores índices, com valores típicos de 1752 a 2190 kWh/m² por ano de radiação incidente. Esse fator coloca o país em vantagem a outros países no que tange à utilização de energia SFV. Na Figura 6, podemos observar a variação de radiação solar no país.

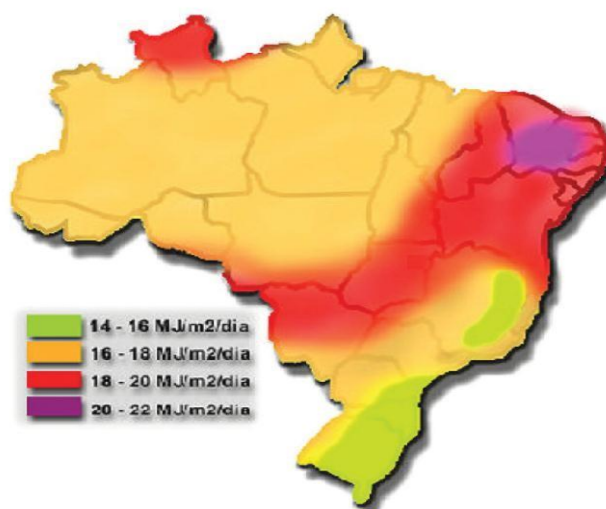


Figura 6 – Variação da Radiação Solar no Brasil
Fonte: [8]

A região centro oeste, é um território privilegiado em relação a radiação solar, principalmente o estado de Goiás, o qual recebe em média de 18 a 20 MJ/m²/dia ou de 5 a 5,6 kWh/m²/dia, considerando 1kWh = 3,6 MJ.

2.3 ENERGIA FOTOVOLTAICA - FV

Como visto em diversas literaturas, a energia SFV é obtida através da conversão da luz em eletricidade. Segundo [9], Edmond Becquerel relata, em 1839, que o aparecimento de uma diferença de potencial (DDP) nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, é produzida pela absorção de luz. A célula é a unidade fundamental do processo de conversão.

O desenvolvimento dessa tecnologia teve o apoio de empresas do setor de telecomunicações para a instalação de sistemas em localidades remotas [9]. Outro fato que impulsionou a energia fotovoltaica (FV) foi a chamada “corrida espacial”, que provocou um significativo avanço na tecnologia, impactando de forma direta no processo de fabricação e desenvolvimento das células. Ainda de acordo com [9], a célula solar continua sendo o meio mais adequado, em relação a custos e peso, para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço.

Neste contexto, percebe-se que a utilização de tal tecnologia era para interesses específicos, visto que os elevados custos impossibilitavam a produção dos materiais em larga escala para “consumo” comum. Entretanto, a crise energética de 1973 mudou esse cenário, fazendo com que se tornasse viável a utilização desse tipo de conversão de energia, e para isso os custos deveriam reduzir em até 100 vezes em relação as células utilizadas nas explorações espaciais [9].

2.3.1 SISTEMA AUTÔNOMO OU ISOLADO (*OFF GRID*)

De acordo com [9], os sistemas de geração solar podem ser classificados em duas categorias principais: autônomo ou isolado (SFI) e SFCR. Esses sistemas podem operar exclusivamente com a fonte fotovoltaica ou combinados com uma ou mais fontes de energia, nesse caso denominados sistemas híbridos.

Segundo [10], os SFI são aqueles que não dependem da rede elétrica convencional para funcionar, sendo possível sua utilização em localidades carentes de rede de distribuição elétrica, tornando-se inviável economicamente para atender um grupo de pequenos consumidores.

Em geral, esse tipo de sistema utiliza alguma forma de armazenamento de energia, como baterias para o uso de aparelhos elétricos ou armazenamento gravitacional para o bombeamento de água para tanques elevados [9]. A Figura 7 apresenta um modelo de SFI, onde fica evidenciado os equipamentos do sistema, que são compostos por módulos, controlador de carga, baterias e inversor.



Figura 7: Exemplo de SFI suprimindo a demanda elétrica de uma residência

Fonte: [11]

2.3.2 SISTEMA CONECTADO À REDE (ON GRID)

São aqueles que trabalham concomitantemente à rede elétrica da distribuidora de energia, isto é, funcionam interligados a rede de distribuição. Esse tipo de conexão foi permitido após a REN 482/2012, conhecida como GD. Esse tipo de sistema trabalha em sincronismo com a rede elétrica, fornecendo potência nos momentos em que a geração excede o consumo, e recebendo potência quando a geração é menor que o consumo.

Para realizar essa medição, utiliza-se um relógio bidirecional, que soma toda a potência injetada e consumida, indicando ao final do mês se o saldo foi positivo ou negativo. Em caso de saldo positivo, tal tipo de conexão permite abater o saldo em outra unidade consumidora (caso obedeça a critérios pré-estabelecidos) ou ficar como crédito para o cliente ao longo de 60 meses. Tais benefícios foram criados a partir da REN 482/2012, resolução que será detalhadamente conceituada mais à frente.

Outro ponto a se destacar em relação aos SFCR é que eles não podem operar “ilhados”, isto é, na falta de energia elétrica da rede de distribuição o sistema desacopla-se da rede, de acordo com as normas de segurança criada pelo PRODIST módulo 3 Seção 3.7 item 4.3 Rev. 724/2016 [12], especificados em suas notas (5) e (6):

(5) Não é necessário relé de sincronismo específico, mas um sistema eletroeletrônico que realize o sincronismo com a frequência da rede e que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção, de maneira que somente ocorra a conexão com a rede após o sincronismo ter sido atingido.

(6) No caso de operação em ilha do acessante, a proteção de anti-ilhamento deve garantir a desconexão física entre a rede de distribuição e as instalações elétricas internas à unidade consumidora, incluindo a parcela de carga e de geração, sendo vedada a conexão ao sistema da distribuidora durante a interrupção do fornecimento.

Devido a essas normas, torna-se necessário a utilização de inversor *Grid Tie*, responsável por realizar a sincronização entre a rede de distribuição e o SFV para que não haja conflito. A Figura 8 apresenta um exemplo de SFCR, evidenciando seus principais componentes como módulos, inversor, relógio bidirecional. Percebe-se que tal conexão não necessita de baterias e reguladores de carga.

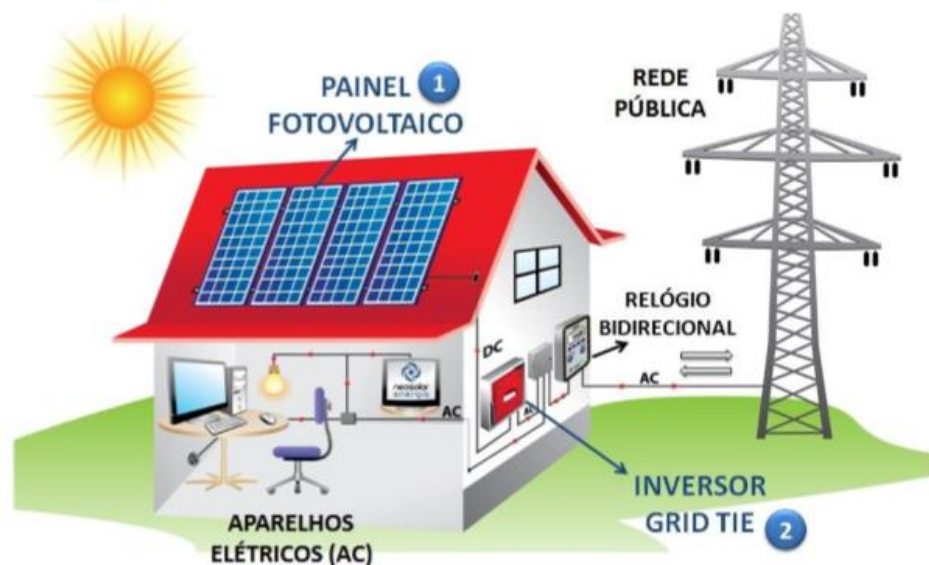


Figura 8: Exemplo de SFCR suprido a demanda elétrica de uma residência

Fonte: [11]

2.4 ASSOCIAÇÃO DOS MÓDULOS

Na instalação de um SF é convencional que os mesmos disponham de 3 tipos de conexões, sendo elas: série, paralela e mista, aplicando-se uma conexão que seja desejada para o sistema. A Figura 9 representa o símbolo de um módulo fotovoltaico (FV).

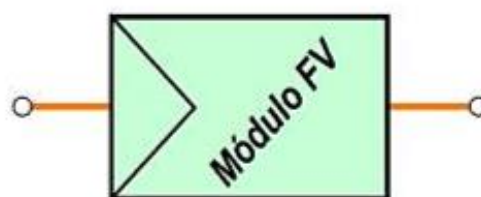


Figura 9: Símbolo que representa um módulo fotovoltaico

Fonte: [13]

2.4.1 ASSOCIAÇÃO SÉRIE

Na associação em série, os módulos são conectados ligando o terminal positivo de um dispositivo FV ao terminal negativo de outro, seguindo esse padrão sucessivamente. É importante ressaltar que nos arranjos série e paralelo os módulos sejam idênticos, com

características iguais de corrente, tensão e potência. A Figura 10 representa a ligação em série de n módulos.

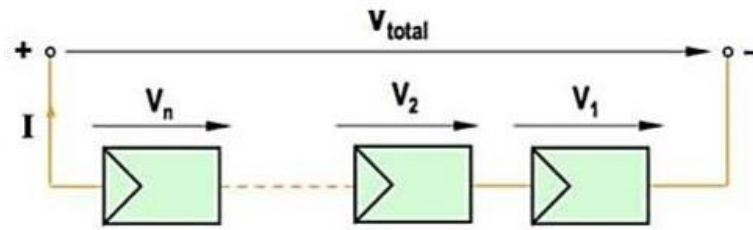


Figura 10: Associação em série de módulos fotovoltaicos

Fonte: [13]

$$V_{total} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = n \cdot V \quad (1)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2)$$

Desse modo, pode-se perceber que quando um arranjo está ligado em série, a corrente é constante, enquanto ocorre um somatório em relação as tensões dos módulos FV, considerando que todos eles sejam iguais.

2.4.2 ASSOCIAÇÃO PARALELA

Na associação em paralelo, ocorre o processo contrário: enquanto as correntes são somadas, a tensão permanece constante, ressaltando que os módulos devem ter as mesmas características. A Figura 11 representa a ligação em paralelo de n módulos.

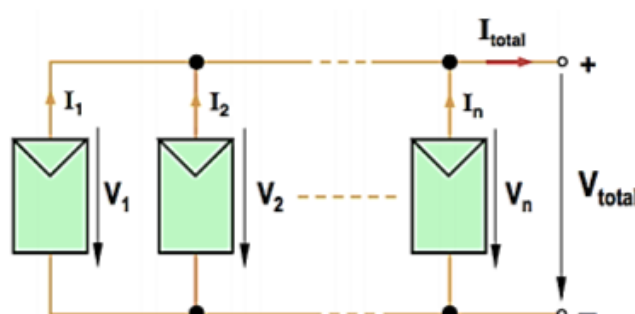


Figura 11: Associação em paralelo de módulos fotovoltaicos

Fonte: [13]

$$V_{total} = V_1 = V_2 \dots V_n = V \quad (3)$$

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_n = n.I \quad (4)$$

2.4.3 ASSOCIAÇÃO MISTA

E por fim têm-se a associação mista dos módulos, onde há uma combinação de módulos em série e paralelo compondo o arranjo FV. Na Figura 12 pode-se observar esse tipo de combinação formada por $n \times m$, onde n representa o número de fileiras de módulos associados em paralelo e m representa o número de módulos associados em série [13].

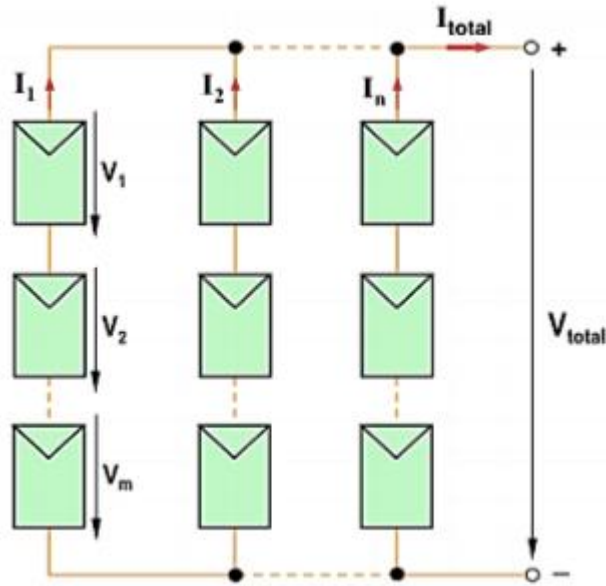


Figura 12: Associação mista de módulos fotovoltaicos

Fonte: [13]

De acordo com a Figura 12, cada fileira têm o mesmo valor de corrente (considerando que os módulos possuem as mesmas características), com isso é possível afirmar que a corrente no arranjo é proporcional a quantidade de fileiras.

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (5)$$

$$I_{total} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = n.I \quad (6)$$

Da mesma forma, a tensão em cada módulo da fileira é igual, com isso pode-se afirmar que a tensão do arranjo é proporcional à quantidade de módulos da fileira, onde é denominada pela letra m .

$$V_{total} = V_1 = V_2 \dots V_n = V \quad (7)$$

$$V_{total} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = n.V \quad (8)$$

Os três tipos de associação devem ser utilizados de acordo com a demanda, sendo a associação mista a mais comum, mas é essencial respeitar as características técnicas dos equipamentos.

2.5 ÂNGULOS

Por se tratar de um trabalho que irá realizar um comparativo entre módulos fotovoltaicos com diferentes ângulos de inclinação e orientações, é fundamental conhecer os ângulos solares, que pode ser visto na Figura 13.

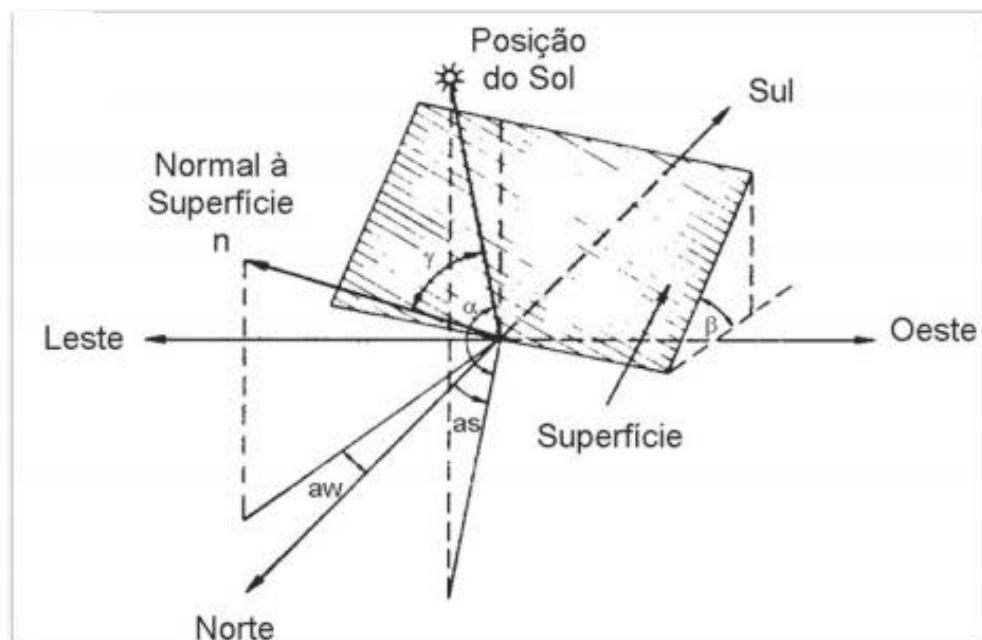


Figura 13: Geometria Solar

Fonte: [14]

De acordo com [14], as definições de cada ângulo são as seguintes:

- Ângulo de Incidência (γ): formado entre os raios solares e a normal à superfície de captação. Quanto menos esse ângulo, mais energia será captada.
- Ângulo Azimutal de Superfície (a_w): Formado pela projeção da normal à superfície do painel solar e a direção norte-sul. Vale ressaltar que para o hemisfério sul o azimuth é o norte, com isso o deslocamento angular será a partir deste ponto, sendo positivo em sentido horário (leste) e negativo no sentido anti-horário (oeste). Esse ângulo pode variar de 180° à -180 . Internacionalmente, convencionou-se o azimuth 0° como sendo o Sul, e o Norte com ângulo azimutal de 180° .
- Ângulo Azimutal do Sol (a_s): É o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Tem as mesmas convenções que o Ângulo Azimutal de Superfície.
- Altura Solar (α): Ângulo entre os raios solares e sua projeção sobre um plano horizontal.
- Inclinação (β): Ângulo entre o painel solar e o plano horizontal.
- Ângulo Horário do Sol (ω): É o deslocamento angular do sol, no sentido Leste-Oeste, a partir do meridiano local, devido ao movimento de rotação da Terra. Como a Terra dá uma volta completa (360°) em torno de si mesma em 24 horas, cada hora corresponde a 15° .
- Ângulo Zenital (θ_z): É o ângulo formado entre os raios solares e a vertical (Zênite). O ângulo zenital é o inverso da altura solar. O sol alcança o Zênite apenas entre os trópicos (zona tropical). Nas demais localidades, não haverá meio dia solar, com isso o ângulo será igual a zero.

Visto conceitualmente cada ângulo que compõe a geometria solar, vale ressaltar que os 2 ângulos que serão habitualmente citados ao longo do trabalho são o “ângulo azimutal de superfície” ou “ângulo de azimuth”, e o “ângulo de inclinação”. Com isso, o tópico seguinte será destinado a conceituar mais detalhadamente esses 2 ângulos.

2.5.1 ÂNGULO DE AZIMUTE E INCLINAÇÃO

Como citado anteriormente, a inclinação ideal do módulo FV depende da latitude do local em que está sendo instalado. Para sistemas isolados um painel com maior inclinação é recomendável, pois garante maior captação nos períodos de menor irradiância, próximo ao solstício de inverno [14]. Para os sistemas conectados à rede, inclinações menores propiciam

maior captação nos períodos próximos aos solstícios de verão, o que gera mais energia e nos países com tarifas diferenciadas, maiores ganhos financeiros [14].

Em relação ao ângulo de inclinação existe diferenciações devido aos variados tipos de sistemas, isto é, para sistemas isolados (SI) é possível encontrar a inclinação ideal de acordo com a equação abaixo:

$$\beta = \phi + \left(\frac{\phi}{4}\right) \quad (9)$$

Sendo:

β = ângulo entre o painel e o plano horizontal.

ϕ = latitude local.

Para SFI, o ângulo ideal de inclinação é dado pela Equação 9, pois busca maximizar a radiação nos meses de menor incidência solar, resultando em uma inclinação maior [14].

Já para SFCR, o ângulo é dado pela Equação 10.

$$\beta = 3,7 + 0,69 * \phi \quad (10)$$

Sendo:

β = ângulo entre o painel e o plano horizontal.

ϕ = latitude local.

Para SFCR o intuito é que o ângulo de inclinação seja o mais próximo possível da latitude local, para que tenha o menor ângulo e assim os maiores valores de irradiação, consequentemente os módulos consigam atingir uma maior geração de energia. Além disso, vale ressaltar que não é indicado ângulos menores que 10°, pelo fato de atrapalhar a “autolimpeza” dos módulos através da água da chuva [14].

Já o azimuth solar trata-se da orientação do módulo em relação a linha do equador, por conseguinte, no hemisfério norte os painéis são orientados para o sul, e no hemisfério sul (caso do presente trabalho) são orientados para o norte. Outro ponto a se destacar, é que ângulos maiores que 30°, tanto para o Leste, quanto para o Oeste, devem ser evitados para não prejudicar a geração de energia, isso pelo fato de a cada 15° de desvio do Norte geográfico representar uma hora de diferença para a captação máxima [14].

De acordo com a Figura 14, pode-se observar a irradiância média ao longo de um dia. O momento de maior captação ocorre durante o meio-dia solar. Quando o ângulo azimutal não

está orientado a 0° (norte geográfico), o horário de maior geração pode mudar para um momento em que a irradiância não é máxima, prejudicando o sistema.

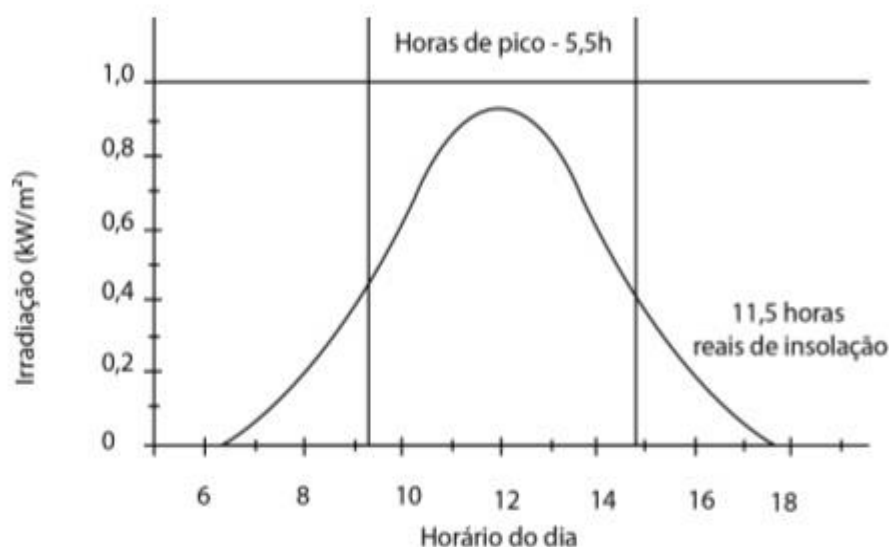


Figura 14 – HSP (Horas de Sol Pico)
Fonte: [14]

2.6 SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS

No decorrer do ano solar, sabe-se que existem quatro subdivisões climáticas: primavera, inverno, outono e verão. Essas estações variam conforme a exposição aos raios solares, ou seja, de acordo com o movimento orbital da Terra em relação ao Sol, onde cada uma apresenta suas respectivas características e ficam marcadas por determinados eventos, como: Solstícios e Equinócios.

Esses dois fenômenos são de fundamental importância para este trabalho, pois apresentam características que influenciam diretamente a geração de energia FV ao longo do ano. O Solstício é um fenômeno astronômico que marca o início do verão ou do inverno. Com isso, ocorre duas vezes ao ano e está associado ao eixo de rotação da Terra, cuja posição é inclinada 23,5° em relação ao seu próprio eixo [15]. Durante o solstício, a luz solar reflete com maior intensidade em um dos hemisférios, em consequência a luz no outro hemisfério é menos intensa, caracterizando estações opostas (verão e inverno) entre os hemisférios sul e norte. Vale ressaltar que tal fenômeno não possui datas exatas que marque o seu início, pelo fato de o ano solar não ter um número exato de dias, sendo aproximadamente 365,24 dias, mas sempre acontecendo próximo aos dias 21 de dezembro (solstício de verão no Hemisfério Sul e solstício

de inverno no Hemisfério Norte) e 21 de junho (solstício de inverno no Hemisfério Sul e solstício de verão no Hemisfério Norte). Na Figura 15 está retratado tal fenômeno.



Figura 15 – Incidência solar durante o solstício
Fonte: [15]

Outro fenômeno de fundamental importância trata-se do Equinócio. O mesmo marca o início da primavera e outono, consequentemente ocorre duas vezes ao ano, por também estar associado ao eixo de rotação da Terra. Possui como característica o fato do dia e a noite terem durações 12 horas iguais. O evento ocorre em consequência da inclinação no eixo da Terra que resulta na incidência da luz solar diretamente sobre a faixa intertropical durante alguns períodos do ano. Como os hemisférios ficam igualmente perpendiculares aos raios solares (vide Figura 15 [16]) acabam recebendo a mesma quantidade de luz solar, o que explica o fato do dia e a noite serem praticamente idênticas nessa data. Assim como os solstícios, os equinócios não possuem datas exatas, mas sempre próximos aos dias 20 de março (equinócio de outono no Hemisfério Sul e equinócio de primavera no Hemisfério Norte) e 23 de setembro (equinócio de primavera no Hemisfério Sul e equinócio de outono no Hemisfério Norte).



Figura 16 – Incidência solar durante o equinócio
Fonte: [15]

2.7 ÍNDICES DE MÉRITO

Índices de méritos na energia solar são métricas utilizadas para avaliar e comparar a eficiência, desempenho e viabilidade econômica de sistemas de energia solar. Sua fórmula algébrica geralmente expressa uma relação entre duas características e/ou propriedades [16].

Nesse contexto, os índices de mérito são capazes de estabelecer a performance de um determinado sistema FV, no que diz respeito a radiação, produção de energia e perdas [16] permitindo então ser feitas comparações com outros sistemas, ainda que tenham diferentes potências, localidades e consequentemente radiações solares diferentes.

Portanto, estes índices servem para avaliar o desempenho e analisar se está ocorrendo alguma falha com o sistema.

Existem três parâmetros de índice de mérito: Fator de Capacidade (FC), Produtividade Anual (Yf) e Desempenho Global (PR), os quais serão apresentados a seguir.

2.7.1 FATOR DE CAPACIDADE (FC)

O FC é o indicador que define o quanto uma usina gera em relação ao máximo que ela poderia gerar. É definido pela razão entre a energia de fato entregue pelo sistema, no período constatado, e a energia que ele entregaria se operasse 100% do tempo com sua potência nominal [17] nas condições padrão (STD – 1000W/m², 25° C e 1,5 AM). A Equação 11 representa esse parâmetro.

$$FC = \frac{E_{CA}}{E_{STD}} = \frac{\int_0^T P_{CA}(t).dt}{\int_0^T P_{STD}(t).dt} \times 100\% \quad (11)$$

Onde:

E_{CA} Energia entregue a rede;

E_{STD} Energia que seria entregue se o sistema operasse 24 h em condições padrão;

P_{CA} Potência entregue à rede elétrica;

P_{STD} Potência do sistema se o sistema operasse 24 h em condições padrão (STD).

Para um melhor entendimento da equação (11) temos uma versão simplificada:

$$FC = \left(\frac{E_t}{P \times t} \right) = \frac{\text{Energia anual}}{\text{Potência} \times 8760} \quad (12)$$

Onde:

E anual [kWh] é a energia gerada em um período de tempo *t* (nesse caso 1 ano);

P [kW] é a Potência Instalada;

t [h] é o intervalo de tempo considerado (nesse caso 1 ano ou 8760 horas).

Vale ressaltar que uma das desvantagens da energia FV é o baixo valor do FC em comparação com outras fontes de geração, pois o sol não fornece energia continuamente ao longo do dia, fazendo com que seu valor no Brasil varie de 13% a 18% para sistemas em bom funcionamento. Em resumo, o fator de capacidade em sistemas fotovoltaicos é uma medida fundamental para avaliar sua eficiência operacional e sua capacidade de fornecer energia elétrica de forma confiável ao longo do tempo.

2.7.2 PRODUTIVIDADE ANUAL (YF)

YF (*Final Yield*) em energia solar refere-se ao rendimento final de um sistema fotovoltaico. O índice de produtividade ou *Yield* de um sistema reflete o desempenho de cada usina fotovoltaica, normalizado em relação à potência instalada, isto é, representa o quanto de energia elétrica um sistema produz, em kWh, por unidade de potência nominal instalada, em kWp normalizado em 1 kWp com objetivo de comparar a produtividade de determinadas plantas [18]. Este índice é dado em horas de sol na condição STC (1000 W/m²) no determinado período de estudo.

A produtividade está vinculada a um intervalo de tempo, normalmente atrelado a um ano de operação, podendo ser também considerado mensalmente. Esse índice é obtido através da equação abaixo [19].

$$Y_F = \frac{1}{P_{STD}} \left[\frac{1}{T} \int_0^T P_{CA}(t) \cdot dt \right] \quad (13)$$

Onde:

P_{CA} Potência entregue à rede elétrica;

P_{STD} Potência do sistema se o sistema operasse 24 h em condições padrão (STD);

T Intervalo de tempo (geralmente 1 ano).

Para um melhor entendimento da equação (14) temos uma versão simplificada:

$$YF = \left(\frac{kWh}{kWp} \right) = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência FV}} \quad (14)$$

2.7.3 RAZÃO DE PERFORMANCE (PR)

O desempenho global ou razão de performance (PR do inglês: *performance ratio*) é definido pela razão entre a produtividade do sistema e a produtividade de referência [20]. Este índice é utilizado para avaliações e comparações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de diferentes latitudes. Se trata de um parâmetro muito útil, pelo fato de quantificar as perdas globais ocorridas no sistema devido à ineficiência do inversor, às perdas na fiação, incompatibilidades na conversão DC para AC, aos componentes de proteção, temperatura dos módulos, instalação incorreta do painel, sujeira e eventuais desligamentos.

Assim, o PR representa a capacidade real do sistema em converter a energia solar disponível no plano dos módulos em eletricidade, pois é a razão entre a energia entregue pelo sistema e a energia que esteve disponível no plano considerado [16]. A Equação 15 e 16 representam esse parâmetro:

$$PR = \left(\frac{Y_F}{Y_r} \right) \quad (15)$$

$$Y_r = \left(\frac{H_t}{G_{ref}} \right) \quad (16)$$

Onde:

Y_r Produtividade de referência;

H_t Irradiação no plano do arranjo, kWh/m²;

G_{ref} Irradiância nas condições padrão (1000W/m²).

A seguir tem-se um exemplo de aplicação real do PR, através de uma equação simplificada que irá avaliar a **Geração Real Anual** em relação a **Geração Teórica Máxima Possível**.

$$PR = \left(\frac{\text{Geração Anual}}{\text{Energia Teórica}} \right) \quad (17)$$

Sendo: *Energia Teórica* = (*I* x *t* x *A* x *R*) Geração Anual: 4.219,15 kWh/ano

I – Irradiação em kWh/m²/dia Irradiação local: 4,68 kWh/m².dia

t – Tempo de Análise em dias Área: 20 m²

A – Área ocupada pelos módulos em m² Rendimento do módulo: 16%

R - Rendimento do módulo Tempo: 365 dias

Logo: Energia Teórica = $(4,68 \times 365 \times 20 \times 0,16) = 5.466,24 \text{ kWh/ano}$

Portanto: $\text{PR} = \left(\frac{4219,15}{5.466,24} \right) = 0,77 \times 100\% = 77\%$

Os valores de PR tendem a ser maiores no inverno do que no verão devido a influência da temperatura. Quanto mais alta a temperatura, mais baixos serão os valores de PR e quanto mais baixa a temperatura, mais alto serão os valores de PR. Vale lembrar que o intervalo de tempo para a análise da PR precisa estar corretamente convertido em dias para o cálculo.

Assim, se um SFV possui um Performance Ratio de 77%, isso significa que as perdas representam 23% do total no sistema. Normalmente as usinas fotovoltaicas apresentam um PR próximo a 75%. Portanto, uma perda em torno de 25% é considerada aceitável. Essas perdas podem ter diversas causas tais como: orientação, inclinação, sombreamento, linha do horizonte, temperatura, incompatibilidade, sujeira, cabos cc, cabos ca, inversor.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS ANALISADOS

Neste trabalho foram escolhidos 3 sistemas fotovoltaicos conectados à rede em diferentes localidades. Para um melhor entendimento, os sistemas foram nomeados com as seguintes abreviações: SFCR I, SFCR II e SFCR III.

A seguir será apresentado o detalhamento de cada sistema analisado, assim como potência instalada, informações dos módulos solares, potência dos inversores, localização, dados de monitoramento, dentre outros parâmetros.

3.1 SFCR I

3.1.1 LOCALIZAÇÃO - SFCR I

A cidade de Mineiros está localizada na região Centro-Oeste do país, no estado de Goiás. Segundo [21] a latitude da cidade corresponde a $17^{\circ} 34' 10''$ S, sua longitude a $52^{\circ} 33' 04''$ W e possui altitude de 750 metros em relação ao nível do mar. De acordo com [22] a latitude e longitude exata do local da instalação do SFCR I é exatamente em $17^{\circ} 33' 48''$ S e $52^{\circ} 32' 47''$ W ou a latitude e longitude em Graus Decimais: -17.56351; -52.54654. Sabe-se que a média diária de irradiação solar, no plano horizontal, corresponde a 5,18 kWh/m².dia e considerando o plano inclinado (ângulo de inclinação do painel igual a latitude do local) corresponde a 5,38 kWh/m².dia, conforme os gráficos das figura 17 e 18.

Para se obter o índice de mérito é necessário da latitude do local em que o sistema se encontra instalado, no caso aproximadamente 18° , e da inclinação dos módulos. Como citado anteriormente, a inclinação ideal deve ser próxima a latitude do local em que o sistema será instalado, com isso, a inclinação considerada foi de 18° para o cálculo da radiação no plano inclinado. A radiação solar incide perpendicularmente à superfície quando o painel está inclinado no mesmo ângulo da latitude do local, maximizando a captação de energia. Ajustar a inclinação para se alinhar com a latitude permite que o módulo fotovoltaico capture mais energia ao longo do ano, especialmente em locais com variação significativa na posição do sol entre as estações. Portanto, é recomendável ajustar a inclinação do módulo para que seja próxima à latitude do local, otimizando a eficiência energética do sistema.

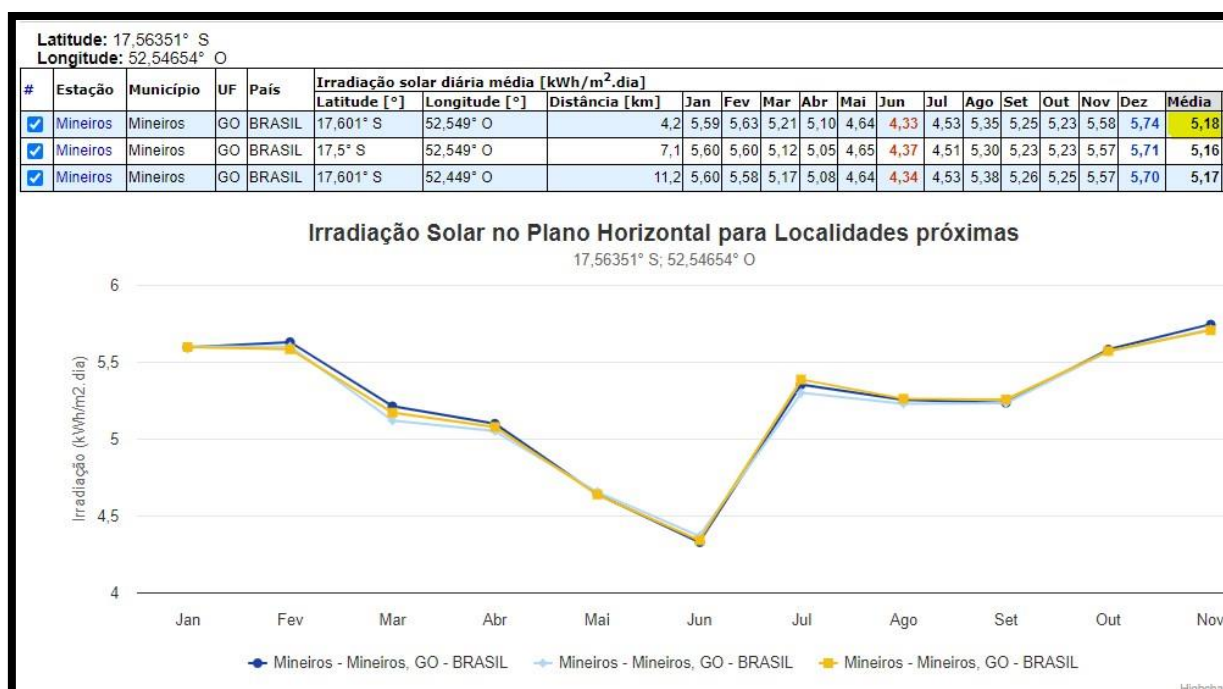


Figura 17 – Irradiação Solar no Plano Horizontal para o SFCR I
Fonte: [22]

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Mineiros
Município: Mineiros, GO - BRASIL
Latitude: 17,601° S
Longitude: 52,549° O
Distância do ponto de ref. (17,56351° S; 52,54654° O): 4,2 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
✓	Plano Horizontal	0° N	5,59	5,63	5,21	5,10	4,64	4,33	4,53	5,35	5,25	5,23	5,58	5,74	5,18
✓	Ângulo igual a latitude	18° N	5,13	5,38	5,28	5,58	5,46	5,28	5,44	6,08	5,48	5,09	5,17	5,20	5,38
✓	Maior média anual	18° N	5,13	5,38	5,28	5,58	5,46	5,28	5,44	6,08	5,48	5,09	5,17	5,20	5,38
✓	Maior mínimo mensal	15° N	5,23	5,44	5,29	5,53	5,35	5,14	5,32	5,99	5,47	5,14	5,26	5,31	5,37

Figura 18 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para o SFCR I
Fonte: [22]

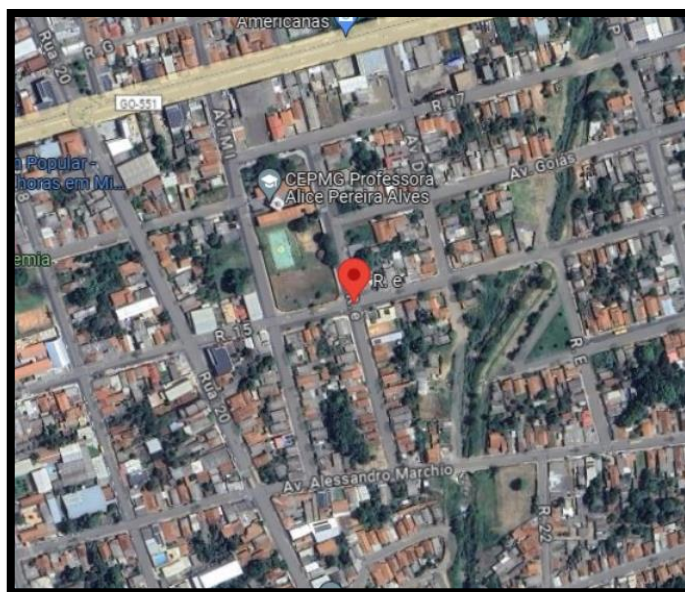


Figura 19 – Localização SFCR I – Mineiros-GO
Fonte [Google Maps]

3.1.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA - SFCR I

O sistema em análise está instalado na cidade de Mineiros-GO. Ele é composto por 12 módulos FV de 450 Wp cada, totalizando 5,40 kWp de potência instalada. Os módulos são fornecidos pelo fabricante RISEN ENERGY, possui modelo RSM144-7-450M e são compostos por silício monocristalino, ocupando uma área de 26,51 m². O SFCR I é constituído de um inversor da marca WEG de 5 kW de potência, modelo, SIW200G M050. Esse inversor possui 2 MPPTs, com 1 entrada por MPPT, assim o sistema foi dividido em 2 *strings* com 6 módulos em série cada arranjo.

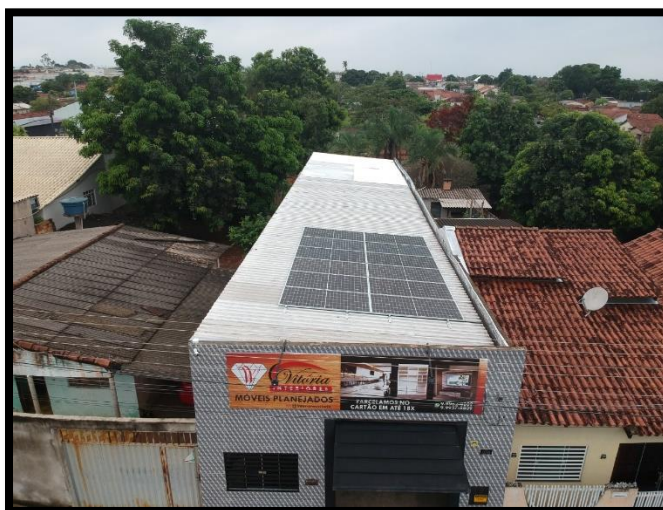


Figura 20 – Módulos - SFCR I – Mineiros-GO
Fonte: [Autoria Própria]



Figura 21 – Inversor - SFCR I – Mineiros-GO
Fonte: [Autoria Própria]

Informações do Módulo	Risen Energy
Potência Máxima (Pm)	450 Wp
Tensão de Máxima Potência (Vmp)	41,30 V
Corrente de Máxima Potência (Imp)	10,90 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	49,70 V
Corrente de Curto Circuito (Isc)	11,50 A
Eficiência do Módulo	20,4%
Temperatura de Operação Nominal (NOTC)	44°C ± 2°C

Tabela I – Dados dos Módulos (Autoria Própria)

Informações do Inversor	WEG
Potência Máxima CC	5000W
Tensão Máxima CC	600 V
Tensão Partida CC	120 V
Corrente Máxima CC	18 A
Potência Nominal CA	5000 W
Tensão Nominal CA	220 V
Corrente Máxima CA	23,9 A
Máxima Eficiência	97,4 %
Distorção Harmônica	< 3%
Grau de Proteção	IP65

Tabela II – Dados do Inversor (Autoria Própria)

Com base nos dados obtidos pelo monitoramento do inversor (Tabela II), pode-se observar no gráfico a seguir a geração de energia no ano de 2023, com uma produção anual total de 7.319,34 kWh.

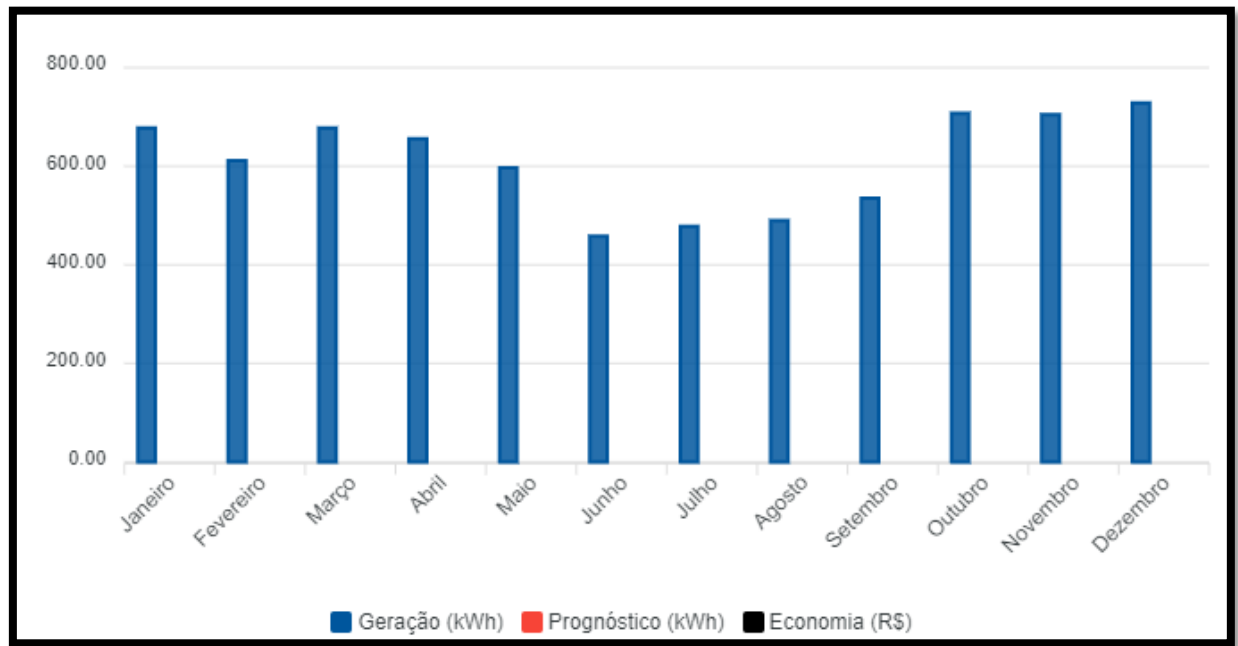


Figura 22 – Geração - SFCR I – Mineiros-GO
Fonte: [App SunWEG]

Mês	Jan/23	Fev/23	Mar/23	Abr/23	Mai/23	Jun/23	Jul/23	Ago/23	Set/23	Out/23	Nov/23	Dez/23
kWh	677,20	611,66	677,20	655,35	597,02	458,20	478	489,50	534,60	707,75	704,50	727,98

Tabela III – Geração Mensal – SFCR I – 2023
Fonte: [Autoria Própria]

O SFCR I foi dimensionado para produzir, em média, 650 kWh/mês, com os módulos posicionados para o Norte geográfico (azimute 0°). Através da tabela III, pode-se observar que as menores gerações mensais de energia ocorreram nos meses de Junho e Julho, devido à inclinação do eixo da Terra e dias mais curtos, por consequência disso, menor é a incidência solar. As maiores gerações mensais de energia ocorreram nos meses de Outubro, Novembro e Dezembro.

3.2 SFCR II

3.2.1 LOCALIZAÇÃO - SFCR II

A cidade de Itumbiara está localizada na região Centro-Oeste do país, no estado de Goiás, com latitude de 18° 25' 09'' S, longitude de 49° 12' 55'' W e altitude de 448 metros em relação ao nível do mar. De acordo com [22] a latitude e longitude exata do local da instalação do SFCR II é exatamente em 18° 24' 40'' S e 49° 12' 45'' W ou a latitude e longitude em Graus Decimais: -18.41125; -49.2125. Sabe-se que a média diária de irradiação solar, no plano horizontal, corresponde a 5,24 kWh/m².dia e considerando o plano inclinado (ângulo de inclinação do painel igual a latitude do local) corresponde a 5,47 kWh/m².dia, conforme os gráficos das figura 23 e 24.

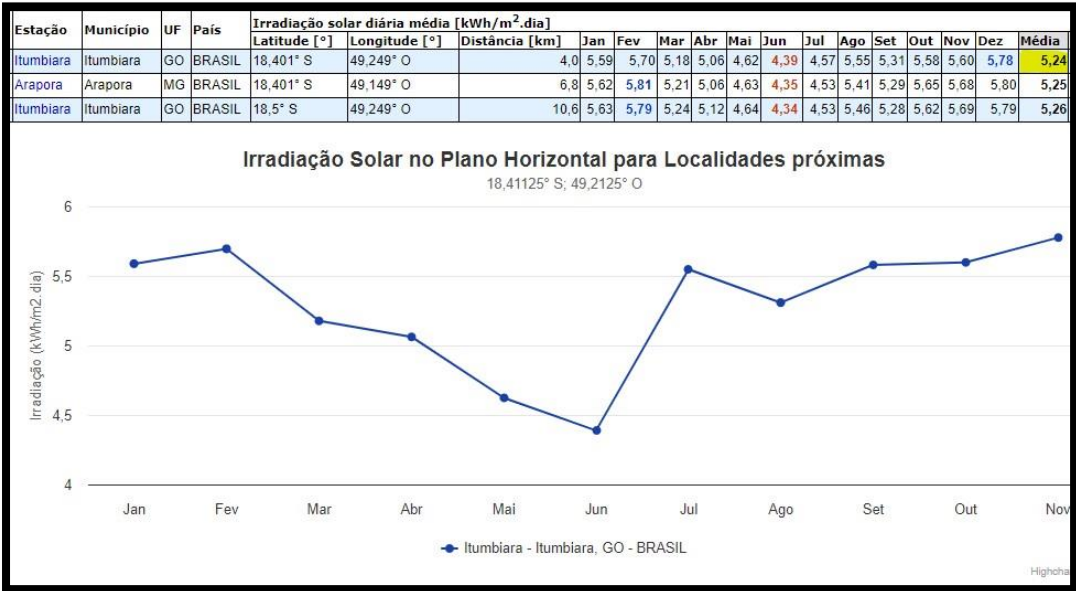


Figura 23– Irradiação Solar no Plano Horizontal para o SFCR II
Fonte: [22]

Cálculo no Plano Inclinado																		
Estação: Itumbiara																		
Município: Itumbiara, GO - BRASIL																		
Latitude: 18,401° S																		
Longitude: 49,249° O																		
Distância do ponto de ref. (18,41125° S; 49,2125° O): 4,0 km																		
#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]															
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média			
✓	Plano Horizontal	0° N	5,59	5,70	5,18	5,06	4,62	4,39	4,57	5,55	5,31	5,58	5,60	5,78	5,24			
✓	Ângulo igual a latitude	18° N	5,14	5,46	5,26	5,56	5,47	5,40	5,54	6,36	5,56	5,45	5,20	5,24	5,47			
✓	Maior média anual	20° N	5,07	5,41	5,25	5,59	5,54	5,49	5,62	6,42	5,56	5,41	5,13	5,16	5,47			
✓	Maior mínimo mensal	15° N	5,23	5,52	5,27	5,51	5,35	5,26	5,40	6,26	5,54	5,50	5,29	5,35	5,46			

Figura 24 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para o SFCR II
Fonte: [22]



Figura 25 – Localização SFCR II – Itumbiara-GO
Fonte [Google Maps]

3.2.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA - SFCR II

O sistema em análise está instalado na cidade de Itumbiara-GO. Ele é composto por 8 módulos FV de 450Wp cada, totalizando 3,6 kWp de potência instalada. Os módulos são fornecidos pelo fabricante JINKO, possui modelo JKM450M-6TL4 e são compostos por silício monocristalino, ocupando uma área de 16,95 m². O SFCR II é constituído de um inversor da marca GROWATT de 3 kW de potência, modelo, MIC 3000TL-X. Esse inversor possui apenas 1 MPPT e 1 entrada, logo o sistema possui uma *string* com 8 módulos conectados em série.

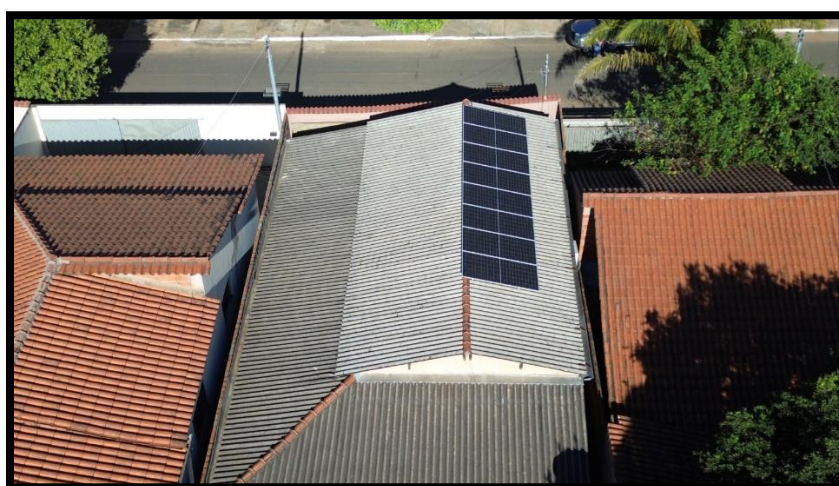


Figura 26 – Módulos - SFCR II – Itumbiara-GO
Fonte: [Autoria Própria]



Figura 27 – Inversor - SFCR II – Itumbiara-GO
Fonte: [Autoria Própria]

Informações do Módulo	Jinko Solar
Potência Máxima (Pm)	450 Wp
Tensão de Máxima Potência (Vmp)	34,17V
Corrente de Máxima Potência (Imp)	13,17 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	41,27 V
Corrente de Curto Circuito (Isc)	13,85 A
Eficiência do Módulo	21,24%
Temperatura de Operação Nominal (NOTC)	45°C ± 2°C

Tabela IV – Dados dos Módulos [Autoria Própria]

Informações do Inversor	GROWATT
Potência Máxima CC	4200W
Tensão Máxima CC	550 V
Tensão Partida CC	80 V
Corrente Máxima CC	16 A
Potência Nominal CA	3000 W
Tensão Nominal CA	220 V
Corrente Máxima CA	14,3 A
Máxima Eficiência	97,6 %
Distorção Harmônica	< 3%
Grau de Proteção	IP65

Tabela V – Dados do Inversor [Autoria Própria]

Com base nos dados obtidos pelo monitoramento do inversor (Tabela V), pode-se observar no gráfico a seguir a geração de energia no ano de 2023, com uma produção anual de 4.662,3 kWh.



Figura 28 – Geração - SFCR II – Itumbiara-GO
Fonte: [App Growatt]

Mês	Jan/23	Fev/23	Mar/23	Abr/23	Mai/23	Jun/23	Jul/23	Ago/23	Set/23	Out/23	Nov/23	Dez/23
kWh	422,8	396,3	390	367,6	409,4	338,3	358	341,8	396,7	408,2	392,5	440,7

Tabela VI – Geração Mensal – SFCR II – 2023
Fonte: [Autoria Própria]

O SFCR II foi dimensionado para produzir, em média, 430 kWh/mês, com os módulos posicionados para o Norte geográfico (azimute 0°). Através da tabela VI, pode-se observar que as menores gerações mensais de energia no ano de 2023 ocorreram nos meses de Junho e Agosto, já sobre as maiores gerações de energia ocorreram nos meses de Janeiro e Dezembro.

3.3 SFCR III

3.3.1 LOCALIZAÇÃO - SFCR III

"A cidade de Alto Araguaia está localizada na região Centro-Oeste do país, no estado do Mato Grosso, com latitude de 17° 18' 53'' S, longitude de 53° 12' 05'' W e altitude de 662 metros em relação ao nível do mar. De acordo com [22] a latitude e longitude do local da instalação do SFCR III é 17° 19' 11'' S e 53° 13' 11'' W ou a latitude e longitude em Graus Decimais: -17.31976; -53.21988. Sabe-se que a média diária de irradiação solar, no plano horizontal, corresponde a 5,15 kWh/m².dia, e considerando o plano inclinado (ângulo de inclinação do painel igual a latitude do local) corresponde a 5,35 kWh/m².dia, conforme os gráficos das figura 29 e 30.

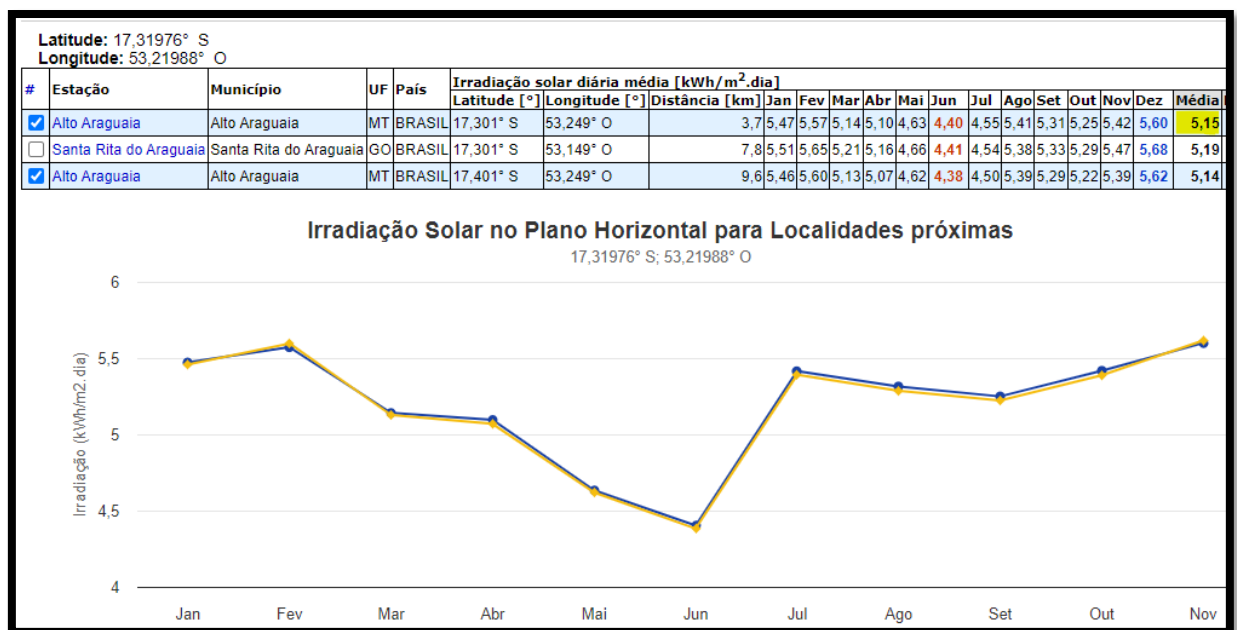


Figura 29 – Irradiação Solar no Plano Horizontal para o SFCR III
Fonte: [22]

Estação: Alto Araguaia Município: Alto Araguaia , MT - BRASIL Latitude: 17,301° S Longitude: 53,249° O Distância do ponto de ref. (17,31976° S; 53,21988° O) :3,7 km															
#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
✓	Plano Horizontal	0° N	5,47	5,57	5,14	5,10	4,63	4,40	4,55	5,41	5,31	5,25	5,42	5,60	5,15
✓	Ângulo igual a latitude	17° N	5,05	5,34	5,21	5,55	5,40	5,33	5,42	6,12	5,54	5,12	5,05	5,10	5,35
✓	Maior média anual	19° N	4,98	5,30	5,19	5,58	5,47	5,41	5,49	6,17	5,54	5,09	4,99	5,03	5,35
✓	Maior mínimo mensal	13° N	5,17	5,43	5,22	5,48	5,25	5,14	5,24	5,99	5,52	5,18	5,16	5,25	5,34

Figura 30 - Irradiação Solar no Plano Inclinado para o SFCR III
Fonte: [22]

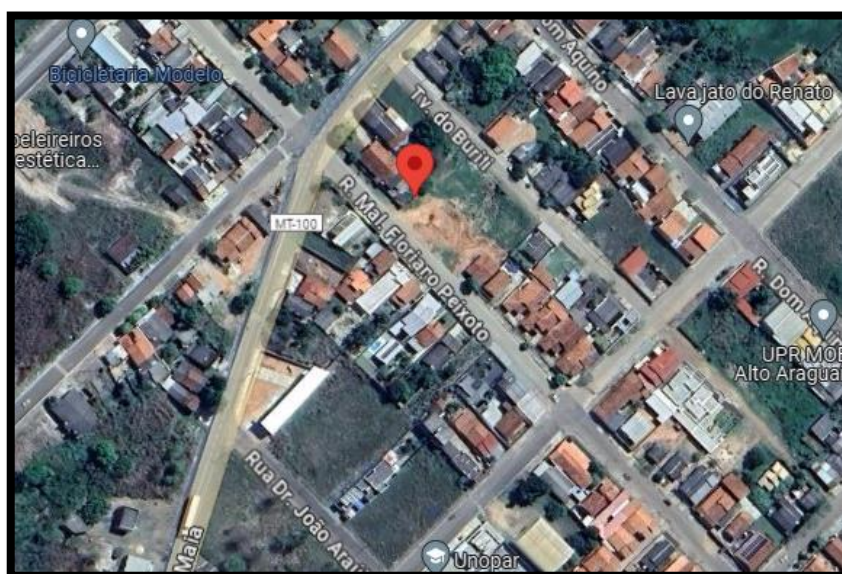


Figura 31 – Localização SFCR III – Alto Araguaia-MT
Fonte [Google Maps]

3.3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA - SFCR III

O sistema em análise está instalado na cidade de Alto Araguaia-MT. Ele é composto por 9 módulos FV de 510Wp cada, totalizando 4,59 kWp de potência instalada. Os módulos são fornecidos pelo fabricante TRINA, possui modelo TSM-DE18M e são compostos por silício monocristalino, ocupando uma área de 21,69 m². O SFCR III é constituído de um inversor da marca WEG de 5 kW de potência, modelo, SIW200G M050. Esse inversor possui duas MPPT's e uma entrada por MPPT, assim o sistema foi instalado com apenas uma *string* de 9 módulos conectados em série.

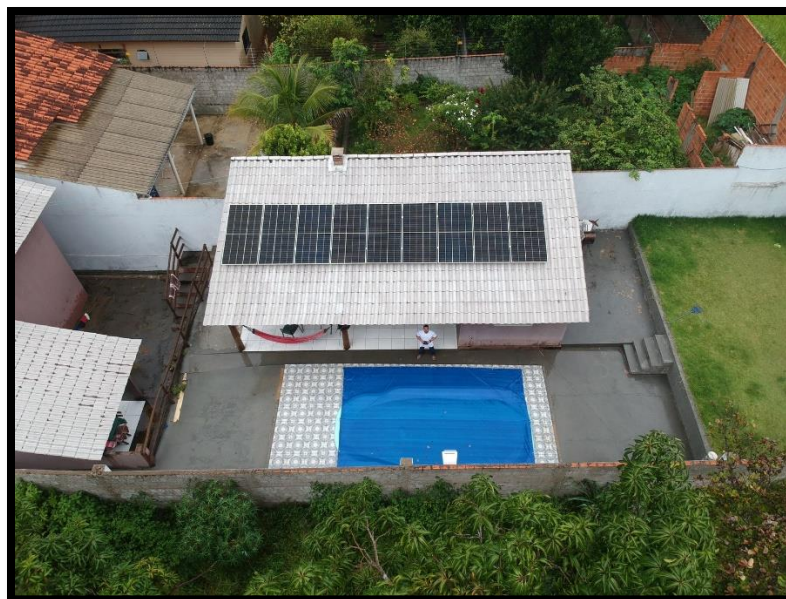


Figura 32 – Módulos - SFCR III – Alto Araguaia-MT
Fonte: [Autoria Própria]



Figura 33 – Inversor - SFCR III – Alto Araguaia-MT
Fonte: [Autoria Própria]

Informações do Módulo	TRINA SOLAR
Potência Máxima (Pm)	510 Wp
Tensão de Máxima Potência (Vmp)	43,2 V
Corrente de Máxima Potência (Imp)	11,81 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	52,10 V
Corrente de Curto Circuito (Isc)	12,42 A
Eficiência do Módulo	21,20 %
Temperatura de Operação Nominal (NOTC)	43°C ± 2°C

Tabela VII – Dados dos Módulos [Autoria Própria]

Informações do Inversor	WEG
Potência Máxima CC	5000W
Tensão Máxima CC	600 V
Tensão Partida CC	120 V
Corrente Máxima CC	18 A
Potência Nominal CA	5000 W
Tensão Nominal CA	220 V
Corrente Máxima CA	23,9 A
Máxima Eficiência	97,4 %
Distorção Harmônica	< 3%
Grau de Proteção	IP65

Tabela VIII – Dados do Inversor (Autoria Própria)

Com base nos dados obtidos pelo monitoramento do inversor (Tabela VIII), pode-se observar no gráfico a seguir a geração de energia no ano de 2023, com uma produção anual total de 6.958,48 kWh.

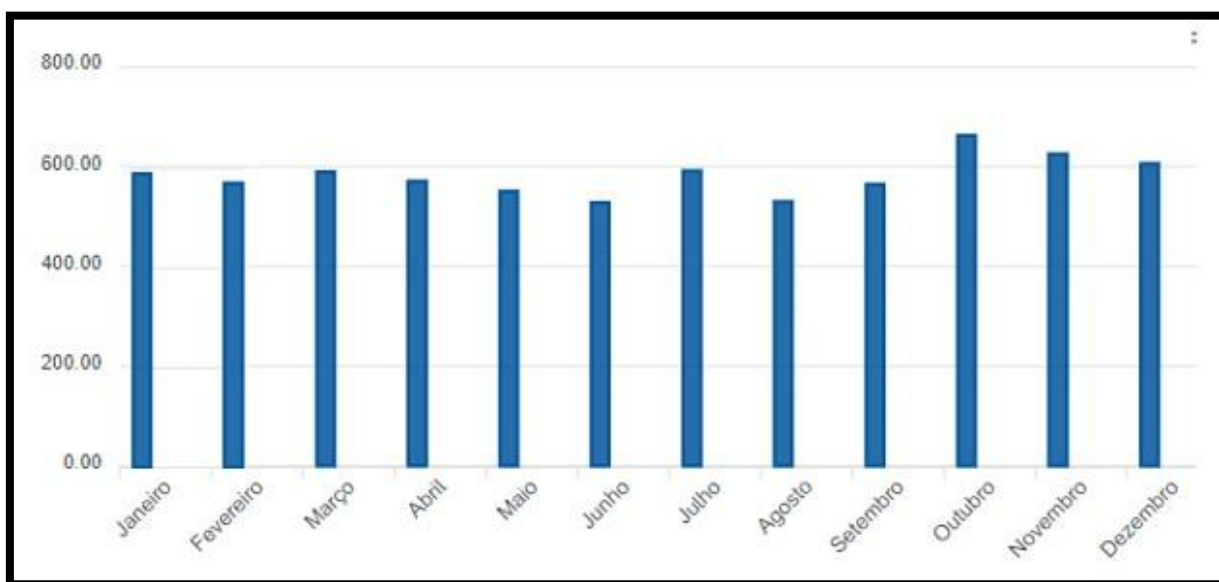


Figura 34 – Geração - SFCR III – Alto Araguaia-MT

Fonte: [App SunWEG]

Mês	Jan/23	Fev/23	Mar/23	Abr/23	Mai/23	Jun/23	Jul/23	Ago/23	Set/23	Out/23	Nov/23	Dez/23
kWh	581	563,10	589,11	570,11	550,06	527,90	591,40	529,30	564	662,20	624,80	605,50

Tabela IX – Geração Mensal – SFCR III – 2023

Fonte: [Autoria Própria]

O SFCR III foi dimensionado para produzir, em média, 550 kWh/mês, com os módulos posicionados para o Norte (azimute 0°). Através da tabela IX, pode-se observar que a menor geração mensal ocorreu no mês de Junho e a maior ocorreu no mês de Outubro.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 SIMULAÇÕES NO PV SYST

Por meio do software PVsyst V7.4.7, foram realizadas simulações individuais dos SFCR's, com pré-dimensionamentos para analisar os cenários ideais de aproveitamento solar de cada sistema. Inicialmente, foram inseridas as reais localizações dos respectivos sistemas deste trabalho no simulador. Depois disso, foram inseridas as potências dos sistemas em kWp, o ângulo de inclinação do módulo e o ângulo de azimute (orientação por ex: Norte). Por fim, foram selecionadas as especificações do sistema, tais como: o tipo de módulo, a disposição do suporte, a tecnologia dos módulos e propriedades da ventilação.

Sendo assim, foi possível analisar a orientação mais adequada para os sistemas FV, avaliar as perdas quando as posições dos painéis não estão orientadas de maneira ideal. Ainda nesse contexto, pode-se analisar o fator de transposição, isto é a razão entre a irradiação incidente no plano do módulo fotovoltaico e a irradiação horizontal, ou seja, o que se ganha ou perde ao inclinar o painel fotovoltaico. Se o número for >1 , significa que existe mais irradiação incidente sobre plano do módulo FV do que irradiação horizontal. Também existe as perdas em relação a orientação ideal e por último, não menos importante que é a irradiação disponível até o plano do módulo em kWh/m².

4.1.1 PV SYST - SFCR I

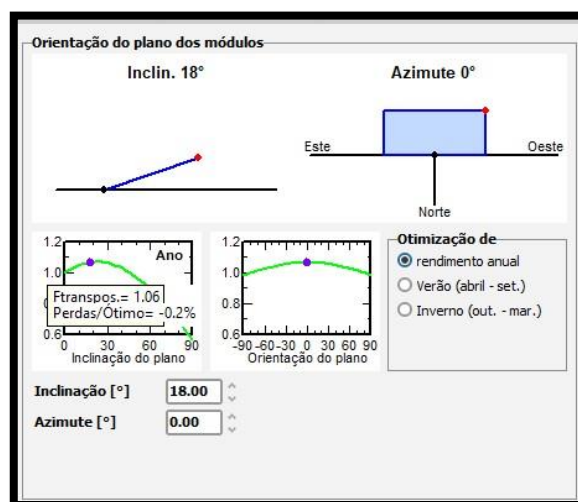


Figura 35 –SFCR I – Mineiros-GO
Fonte: [PV SYST 7.4]

Como pode-se observar na Figura 35, considerou-se a inclinação do módulo igual à latitude do local (arredondada para 18°) e a orientação para o Norte (0°). O Fator de Transposição foi de 1.06 e as perdas no cenário ideal foi de 0.2%.

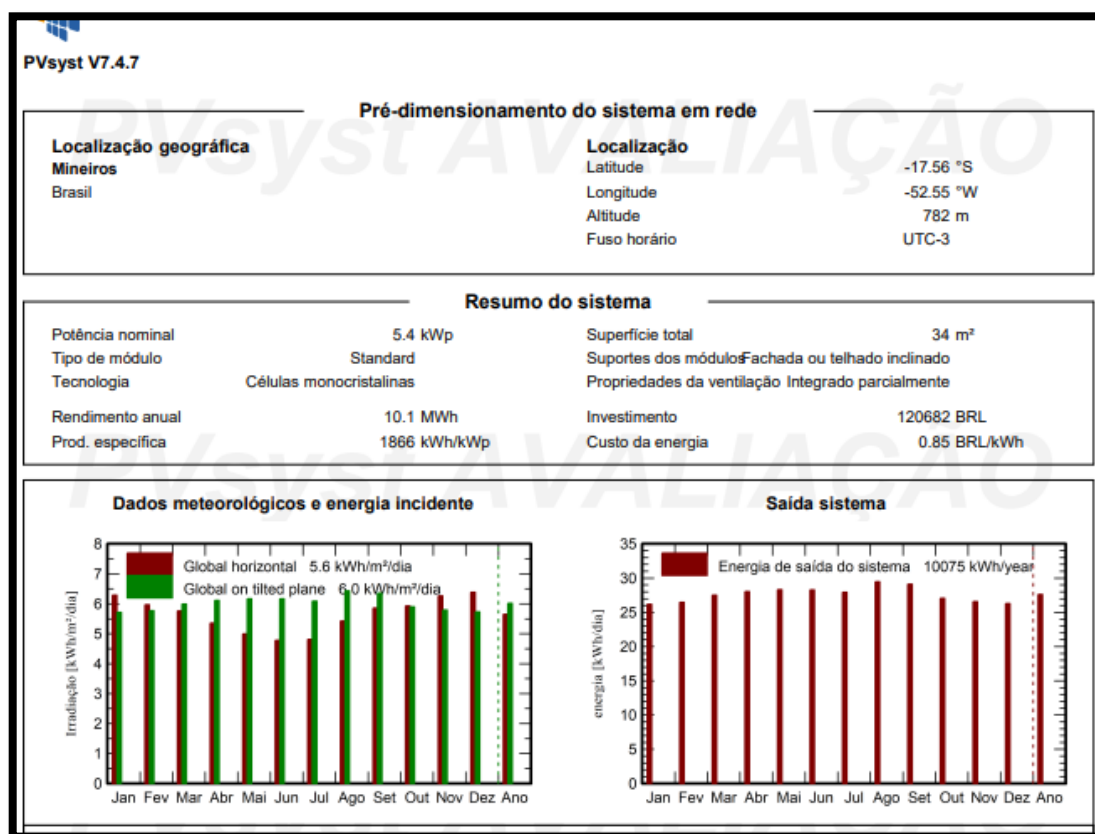


Figura 36 –SFCR I – Mineiros-GO
Fonte: [PV SYST 7.4]

Nesse contexto, conforme mostrou a figura 36, para um cenário ideal do SFCR I, seriam necessários 34 m² de superfície solar, inclinação de 18°, com irradiação de 6,0 kWh/m².dia e orientação para o Norte. Por conseguinte, o rendimento seria em torno de 10.000 kWh/ano.

4.1.1.1 SFCR I - ÍNDICE DE MÉRITO – FC

Segundo a equação 12, determina-se o Fator de Capacidade do SFCR I com base na energia elétrica real e a produção de energia teórica se o sistema operasse 24h do dia em sua potência nominal (1000W/m² e 25°C).

Assim, tem-se:

$$FC = \left(\frac{E_t}{P \times t} \right) = \frac{\text{Energia anual}}{\text{Potência} \times 8760} = \frac{7319,34 \text{ kWh}}{5,4 \times 8760 \text{ h}} = 0,154 \times 100\% = \mathbf{15,47\%}$$

4.1.1.2 SFCR I - ÍNDICE DE MÉRITO – YF

Conforme a Equação 14, foi possível analisar o parâmetro de produtividade anual do sistema SFCR I, discutido no Capítulo 2. Para isso, considerou-se a razão entre a energia total produzida pelo sistema em um ano e a potência do sistema em kWp. Assim, tem-se:

$$YF = \left(\frac{kWh}{kWp} \right) = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência FV}}$$

$$YF = \left(\frac{\frac{7.319,34}{12 \text{ meses}}}{5,4} \right) = \frac{112,952}{30 \text{ dias}} = 3,76 \frac{kWh}{kWp} / dia$$

4.1.1.3 SFCR I - ÍNDICE DE MÉRITO – PR

Segundo nos mostrou as equações 15 e 16 e os dados da tabela I, pode-se determinar o desempenho global do sistema FV para que possa ser avaliado e comparado com outros sistemas fotovoltaicos conectados à rede de diferentes latitudes entre outros parâmetros de operações.

Assim, tem-se:

Geração Anual: 7.319,34 kWh/ano

Irradiação local: 5,38 kWh/m².dia

Área: 26,51 m²

Rendimento do módulo: 20,4 %

Ano: 365 dias

Logo: Energia Teórica = (5,38 x 365 x 26,51 x 0,204) = **10.619,76 kWh/ano**

Portanto: **PR** = $\left(\frac{7.319,34}{10.619,76} \right) = 0,69 \times 100\% = \mathbf{69\%}$

4.1.2 PV SYST - SFCR II

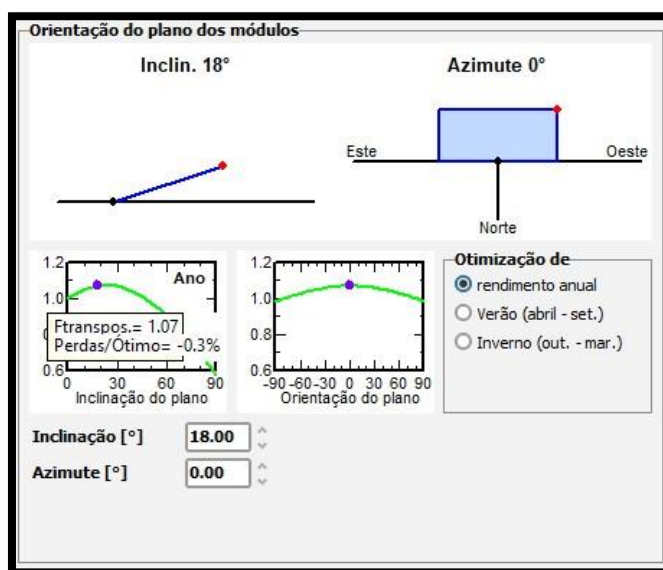


Figura 37 – SFCR II – Itumbiara-GO
Fonte: [PV SYST 7.4]

Como pode-se observar na Figura 37, considerou-se a inclinação do módulo igual à latitude do local (arredondada para 18°) e a orientação para o Norte (0°). O Fator de Transposição foi de 1.07 e as perdas no cenário ideal foi de 0.3%.

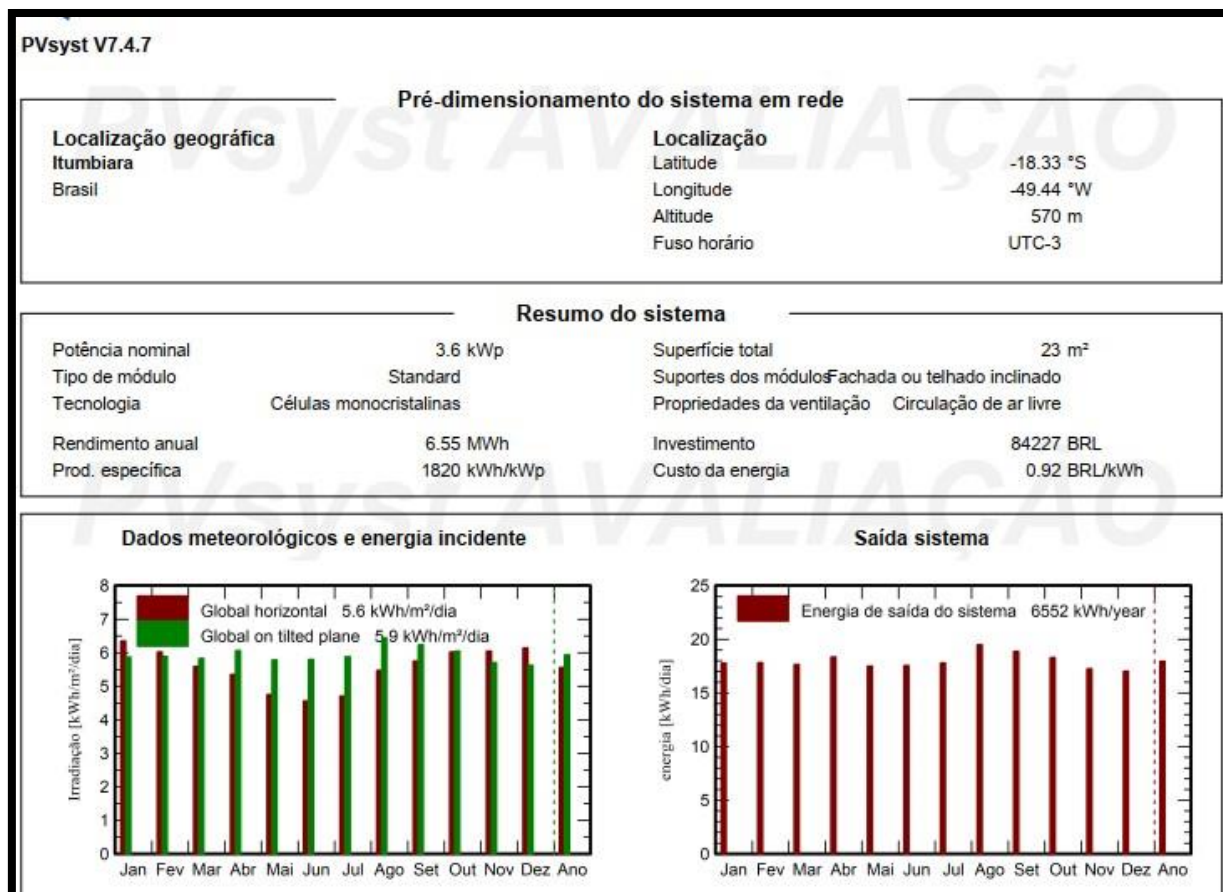


Figura 38 – SFCR II – Itumbiara-GO

Fonte: [PV SYST 7.4]

Nesse contexto, conforme mostrou a figura 38, para um cenário ideal do SFCR II, seriam necessários 23 m² de superfície solar, inclinação de 18°, com irradiação de 5,9 kWh/m².dia e orientação para o Norte. Por conseguinte, o rendimento seria em torno de 6.500 kWh/ano.

4.1.2.1 SFCR II - ÍNDICE DE MÉRITO – FC

Segundo a equação 12, determina-se o Fator de Capacidade do SFCR II com base na energia elétrica real e a produção de energia teórica se o sistema operasse 24h do dia em sua potência nominal (1000W/m² e 25°C).

Assim, tem-se:

$$FC = \left(\frac{E_t}{P \times t} \right) = \frac{\text{Energia anual}}{\text{Potência} \times 8760} = \frac{4.662,3 \text{ kWh}}{3,6 \times 8760 \text{ h}} = 0,147 \times 100\% = \mathbf{14,78\%}$$

4.1.2.2 SFCR II - ÍNDICE DE MÉRITO – YF

Conforme a equação 14, foi possível analisar o parâmetro de produtividade anual do sistema SFCR II, também visto no capítulo 2. Para isso, considerou-se a razão entre a energia total produzida pelo sistema em um ano e a potência do sistema em kWp. Assim, tem-se:

$$YF = \left(\frac{kWh}{kWp} \right) = \frac{Energia Gerada}{Potência FV}$$
$$YF = \left(\frac{\frac{4.662,3}{12 \text{ meses}}}{3,6} \right) = \frac{107,92}{30 \text{ dias}} = 3,59 \frac{kWh}{kWp} / dia$$

4.1.2.3 SFCR II - ÍNDICE DE MÉRITO – PR

Segundo nos mostrou as equações 15 e 16 e os dados da tabela IV e V, pode-se determinar o desempenho global do sistema FV para que possa ser avaliado e comparado com outros sistemas fotovoltaicos conectados à rede de diferentes latitudes entre outros parâmetros de operações.

Assim, tem-se:

Geração Anual: 4.662,3 kWh/ano

Irradiação local: 5,47 kWh/m².dia

Área: 16,95 m²

Rendimento do módulo: 21,24 %

Ano: 365 dias

Logo: Energia Teórica = (5,47 x 365 x 16,95 x 0,2124) = **7.187,93 kWh/Ano**

Portanto: **PR** = $\left(\frac{4.662,3}{7.187,93} \right) = \times 100\% = \mathbf{64,86\%}$

4.1.3 PV SYST - SFCR III

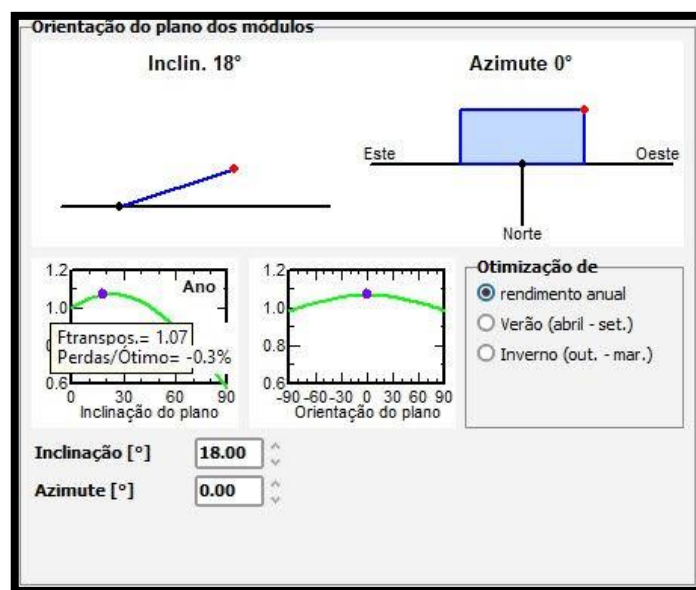


Figura 39 – SFCR III – Alto Araguaia-MT
Fonte: [PV SYST 7.4]

Como pode-se observar na Figura 39, considerou-se a inclinação do módulo igual à latitude do local (arredondada para 18°) e a orientação para o Norte (0°)." O Fator de Transposição foi de 1.07 e as perdas no cenário ideal foi de 0.3%.

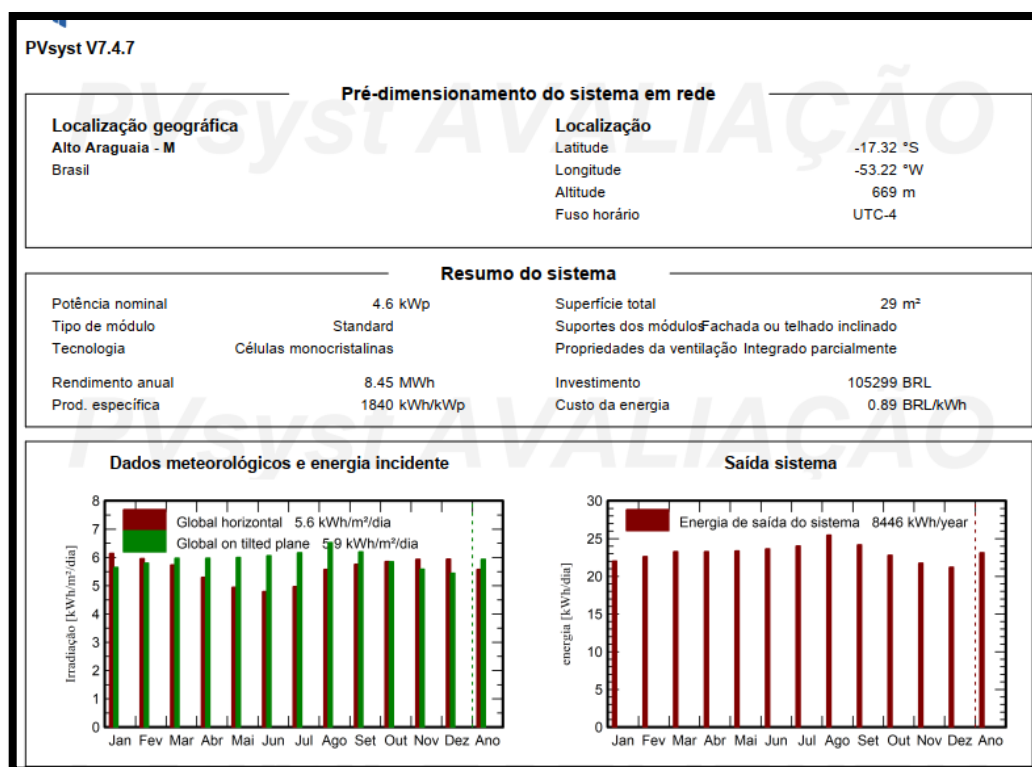


Figura 40 – SFCR III – Alto Araguaia-MT
Fonte: [PV SYST 7.4]

Ainda nesse contexto, segundo mostrou a figura 40, para um cenário ideal do SFCR III, seriam necessários 29 m² de superfície solar, inclinação de 18°, com irradiação de 5,9 kWh/m².dia e orientação para o Norte. Por conseguinte, o rendimento seria em torno de 8.500 kWh/ano.

4.1.3.1 SFCR III - ÍNDICE DE MÉRITO – FC

Determina-se o Fator de Capacidade do SFCR III com base na energia elétrica real e a produção de energia teórica se o sistema operasse 24h do dia em sua potência nominal (1000W/m² e 25°C).

Assim, tem-se:

$$FC = \left(\frac{E_t}{P \times t} \right) = \frac{\text{Energia anual}}{\text{Potência} \times 8760} = \frac{6.958,48 \text{ kWh}}{4,59 \times 8760 \text{ h}} = 0,173 \times 100\% = \mathbf{17,30\%}$$

4.1.3.2 SFCR III - ÍNDICE DE MÉRITO – YF

Conforme a equação 14, foi possível analisar o parâmetro de produtividade anual do sistema SFCR III, também discutido no capítulo 2. Para isso, considerou-se a razão entre a energia total produzida pelo sistema em um ano e a potência do sistema em kWp. Assim, tem-se:

$$YF = \left(\frac{kWh}{kWp} \right) = \frac{Energia\ Gerada}{Potência\ FV}$$

$$YF = \left(\frac{\frac{6.958,48}{12\ meses}}{4,59} \right) = \frac{126,33}{30\ dias} = 4,21 \frac{kWh}{kWp} / dia$$

4.1.3.3 SFCR III - ÍNDICE DE MÉRITO – PR

Segundo nos mostrou as equações 15 e 16 e os dados da tabela VII e VIII, pode-se determinar o desempenho global do sistema FV para que possa ser avaliado e comparado com outros sistemas fotovoltaicos conectados à rede de diferentes latitudes entre outros parâmetros de operações.

Assim, tem-se:

Geração Anual: 6.958,48 kWh/ano

Irradiação local: 5,35 kWh/m².dia

Área: 21,69 m²

Rendimento do módulo: 21,20 %

Ano: 365 dias

Logo: Energia Teórica = (5,35 x 365 x 21,69 x 0,2120) = **8.979,29 kWh/Ano**

Portanto: **PR** = $\left(\frac{6.958,48}{8.979,29} \right) = \times 100\% = 77,49\%$

4.2 COMPARATIVO DOS ÍNDICES DE MÉRITO DOS SISTEMAS ANALISADOS E OUTROS INDICADORES

Conforme apresentado nos resultados da seção 4.1, pode-se comparar os índices de mérito dentre outros parâmetros e indicadores dos SFCR's deste trabalho, tais como, Geração Prevista, Geração Produzida, Geração ideal, Fator de Capacidade, Produtividade Anual, Razão de Performance, Perdas no Campo Fotovoltaico, Perdas no Sistema dentre outros.

Sistema	Início	Geração Prevista	Geração Produzida	Geração Ideal	irrad. Local	FC	YF	PR	LC	LS
SFCR I	2022	7.800 kWh	7.319,34 kWh	10.000 kWh	5,38 kWh/m ² .dia	15,47%	3,76 kWh/kWp/dia	69%	0,84	1,42
SFCR II	2021	5.184 kWh	4.662,30 kWh	6.500 kWh	5,47 kWh/m ² .dia	14,74%	3,59 kWh/kWp/dia	64,86%	0,87	1,46
SFCR III	2022	6.600 kWh	6.958,48 kWh	8.500 kWh	5,35 kWh/m ² .dia	17,30%	4,21 kWh/kWp/dia	77,49%	0,83	0,90

Tabela X – Indicadores - SFCR's – 2023

Fonte: [Autoria Própria]

Conforme a tabela X, o sistema com maior rendimento anual foi o SFCR III, seguido pelo SFCR I e, por último, o SFCR II. No quesito índice de mérito em relação ao Fator de Capacidade (FC), o comportamento foi o mesmo, a maior taxa de eficiência operacional foi a do SFCR III, em seguida o SFCR I e por último o SFCR II. Vale ressaltar que os sistemas analisados tiveram FC's acima de 13%, isso nos traduz um bom funcionamento dos SFCR's. Outro índice de mérito indispensável é o de Produtividade Anual (YF), para um melhor entendimento, foi relacionado o rendimento final diário de cada sistema fotovoltaico deste trabalho. O SFCR III obteve o maior índice, seguido do SFCR I e SFCR II respectivamente.

Conforme o gráfico da figura 41 a seguir, percebe-se que ao longo dos meses do ano de 2023, o SFCR I obteve uma variação mais expressiva no tocante a geração de energia em kWh, principalmente nos meses de Junho e Julho. Já no SFCR II a linha de geração foi mais estável, se comparado aos outros dois sistemas, pois a geração não teve grandes variações na produção mensal. Por conseguinte, o SFCR III obteve um comportamento intermediário em relação a produção de energia, sem grandes variações nos meses do ano.

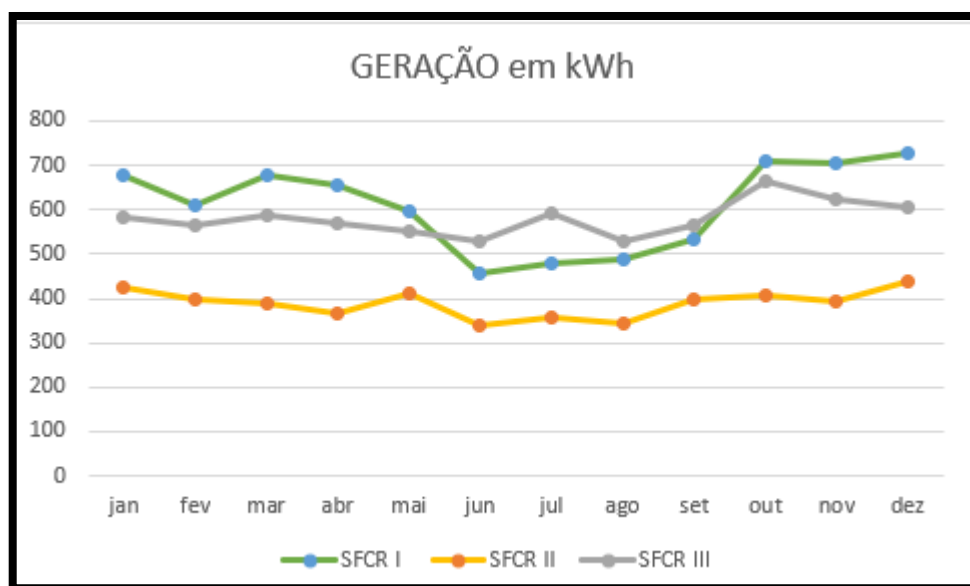


Figura 41 – Geração em kWh – (SFCR's – 2023)
Fonte: [Autoria Própria]

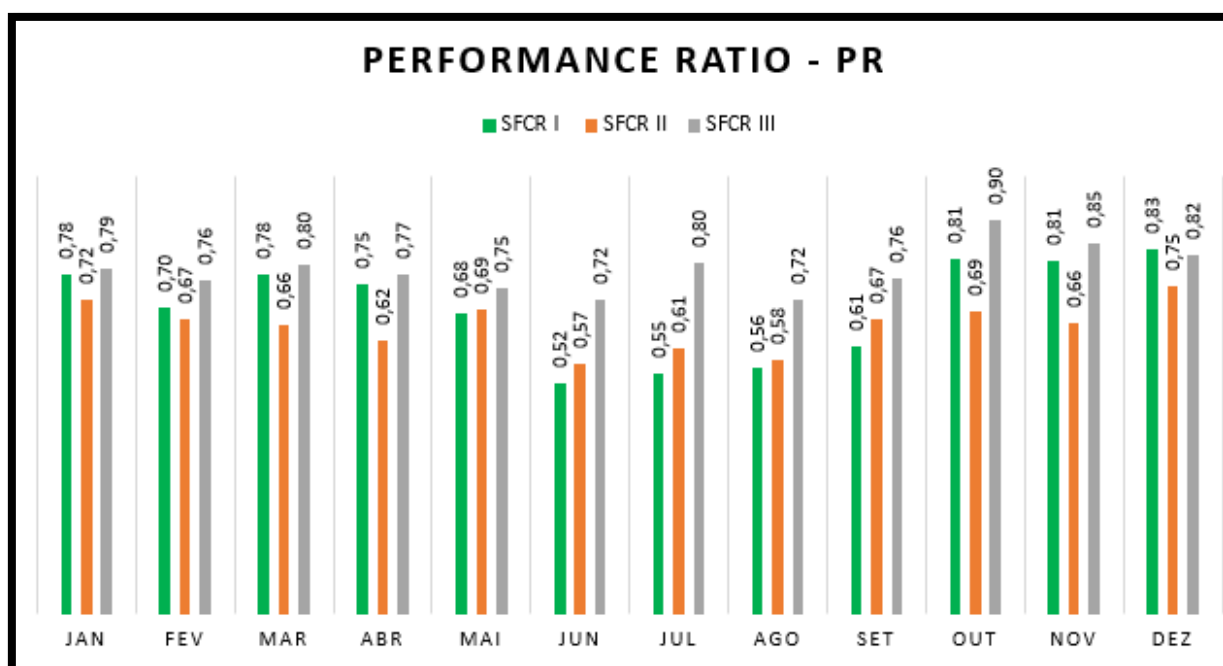


Figura 42 – Performance Ratio (SFCR's – 2023)
Fonte: [Autoria Própria]

Na Figura 42, é possível analisar o índice de mérito mais relevante no contexto de energia solar: o Rendimento Global, ou Performance Ratio (PR), que permite avaliar a qualidade do sistema fotovoltaico. Dentre eles, destaca-se o *SFCR III*, cujo o mesmo obteve o maior rendimento em Outubro de 2023 (0,90 ou 90%). Sabe-se que, quanto mais próximo de

100% o valor encontrado, mais eficaz é o sistema fotovoltaico. Logo, o acompanhamento regular da PR permite o controle do progresso do rendimento do SFV sendo capaz de identificar possíveis falhas.

Ainda neste seguimento, outros parâmetros de performance para análises de SFCR's podem ser destacados tais como: índice de produção de referência (YR), índice de produção do campo fotovoltaico (YA), perdas no campo fotovoltaico (LC) e perdas no restante do sistema (LS). [23]

Meses	SFCR I	SFCR II	SFCR III
JAN	5,71	5,87	5,65
FEV	5,77	5,89	5,8
MAR	6	5,83	5,97
ABR	6,11	6,07	5,98
MAI	6,17	5,78	6
JUN	6,17	5,8	6,06
JUL	6,09	5,88	6,17
AGO	6,43	6,45	6,53
SET	6,35	6,24	6,2
OUT	5,90	6,05	5,85
NOV	5,79	5,7	5,58
DEZ	5,73	5,63	5,44
Média	6,02	5,93	5,94

Tabela XI – Índice de Produção de Referência – (YR)
Fonte: [PVsyst]

Conforme a Tabela XI, os sistemas tiveram YR's muito próximos, com o SFCR I apresentando a melhor média de produção de referência, seguido pelo SFCR III e, por último, pelo SFCR II. Vale ressaltar que este parâmetro avalia a quantidade total de energia produzida no sistema quando se diz que o mesmo está funcionando com eficiências nominais, isto é, no modo padrão STC (*Standard Testing Conditions*). Considera-se representado como a razão entre a irradiância incidente no plano do gerador e irradiância global no STC. [23]

A irradiância incidente no plano gerador em (kWh/m²) foi obtida pela simulação do PVsyst e a irradiância global padrão é 1 kW/m².

Meses	SFCR I	SFCR II	SFCR III
JAN	5,01	5,10	4,96
FEV	4,57	4,62	4,60
MAR	5,26	5,06	5,24
ABR	5,19	5,10	5,08
MAI	5,41	5,03	5,27
JUN	5,24	4,87	5,15
JUL	5,35	5,11	5,41
AGO	5,64	5,60	5,73
SET	5,40	5,24	5,27
OUT	5,18	5,25	5,13
NOV	4,92	4,80	4,74
DEZ	5,02	4,89	4,78
Média	5,18	5,06	5,11

Tabela XII – Índice de Produção do Campo Fotovoltaico – (YA)
Fonte: [Autoria Própria]

Na Tabela XII, os sistemas tiveram YA's muito próximos, com o SFCR I apresentando a maior média anual, seguido pelo SFCR III e pelo SFCR II. O YA refere-se a energia produzida em CC pela potência nominal instalada, isto é, o índice de Produção do Campo Fotovoltaico, foi dado pela energia gerada em (kWh/mês) de cada sistema simulado no PVsyst, pela potência instalada em kWp por 30 dias do mês. A tabela XIII mostra como foi a realidade e a simulação de geração de energia em kWh/mês.

SISTEMA	SFCR I		SFCR II		SFCR III	
kWp	5,4		3,6		4,59	
Geração em kWh	Real	PVsyst	Real	PVsyst	Real	PVsyst
JAN	677,2	812	422,8	551	581	683
FEV	611,66	741	396,3	499	563,1	633
MAR	677,2	852	390	547	589,11	722
ABR	655,35	841	367,6	551	570,11	699
MAI	597,02	877	409,4	543	550,06	725
JUN	458,2	849	338,3	526	527,9	709
JUL	478	866	358	552	591,4	745
AGO	489,5	914	341,8	605	529,3	789
SET	534,6	874	396,7	566	564	725
OUT	707,75	839	408,2	567	662,2	706
NOV	704,5	797	392,5	518	624,8	653
DEZ	727,98	814	440,7	528	605,5	658
Média	609,91	839,66	388,52	546,08	579,87	703,91

Tabela XIII – Geração Real x Geração PVsyst
Fonte: [Autoria Própria]

Meses	SFCR I	SFCR II	SFCR III
JAN	4,18	3,91	4,22
FEV	3,78	3,67	4,09
MAR	4,18	3,61	4,28
ABR	4,05	3,40	4,14
MAI	3,69	3,79	3,99
JUN	2,83	3,13	3,83
JUL	2,95	3,31	4,29
AGO	3,02	3,16	3,84
SET	3,30	3,67	4,10
OUT	4,37	3,78	4,81
NOV	4,35	3,63	4,54
DEZ	4,49	4,08	4,40
Média	3,76	3,6	4,21

Tabela XIV– Produtividade Anual (YF)

Fonte: [Autoria Própria]

Como visto anteriormente na tabela X, pode-se ainda observar com mais detalhes o índice de mérito de Produtividade anual (YF), considerando mês a mês de cada SFCR deste trabalho. A tabela XIV reforça o comportamento desse parâmetro ao longo do ano de 2023.

No âmbito de perdas dos SFCR's, destaca-se o indicador de perda energética do campo fotovoltaico (LC), em que a energia é perdida por diversos fatores, como perdas térmicas, no cabeamento CC, na qualidade do módulo, sombreamento, sujeira, perdas de regulação e outras ineficiências. E ainda nesse contexto, existem as perdas no resto do sistema (LS), que são as perdas no inversor, elementos de proteção e conexão à rede. Foi possível calcular a partir dos índices descritos e conforme as equações 18 e 19.

$$LC = (YR - YA) \quad (18)$$

$$LS = (YA - YF) \quad (19)$$

Assim, pode-se verificar o comportamento das perdas mês a mês de cada sistema fotovoltaico analisado nas Tabelas XV e XVI. O SFCR III foi o sistema com as menores perdas em média, seguido pelo SFCR I e, por último, pelo SFCR II.

Meses	SFCR I	SFCR II	SFCR III
JAN	0,70	0,77	0,69
FEV	1,20	1,27	1,20
MAR	0,74	0,77	0,73
ABR	0,92	0,97	0,90
MAI	0,76	0,75	0,73
JUN	0,93	0,93	0,91
JUL	0,74	0,77	0,76
AGO	0,79	0,85	0,80
SET	0,95	1,00	0,93
OUT	0,72	0,80	0,72
NOV	0,87	0,90	0,84
DEZ	0,71	0,74	0,66
Média	0,84	0,87	0,83

Tabela XV– Perdas no campo fotovoltaico – LC
Fonte: [Autoria Própria]

Meses	SFCR I	SFCR II	SFCR III
JAN	0,83	1,19	0,74
FEV	0,80	0,95	0,51
MAR	1,08	1,45	0,97
ABR	1,15	1,70	0,94
MAI	1,73	1,24	1,27
JUN	2,41	1,74	1,32
JUL	2,40	1,80	1,12
AGO	2,62	2,44	1,89
SET	2,10	1,57	1,17
OUT	0,81	1,47	0,32
NOV	0,57	1,16	0,20
DEZ	0,53	0,81	0,38
Média	1,42	1,46	0,90

Tabela XVI – Perdas no restante do sistema - LS
Fonte: [Autoria Própria]

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos, observa-se que o SFCR III apresentou o melhor rendimento em relação a todos os índices analisados, seguido pelo SFCR I e, por último, pelo SFCR II. Comparando a energia real produzida pela energia prevista pelo PVsyst, conforme visto na tabela XIII, o sistema que obteve melhor índice de produção foi o SFCR III, pois a manutenção preventiva de limpeza dos módulos estavam sendo realizadas a cada 3 meses o que influenciou o resultado.

Outro fator que pode-se destacar é a irradiação do local analisado. Nem sempre a maior irradiação sobre o sistema fotovoltaico acarretará em um maior rendimento, por exemplo a irradiação do SFCR II é superior ao do SFCR III e do SFCR I, porém no contexto geral de eficiência do sistema, o SFCR II foi inferior aos demais. Com relação aos índices de mérito analisados (FC, YF e PR), vale ressaltar que todos os sistemas deste trabalho apresentaram valores de FC acima da média nacional que variam de 13% a 18% para sistemas em um bom funcionamento, independente do ângulo de inclinação ou azimute. Já em relação ao YF, os valores permaneceram no que era previsto, seguindo a mesma ordem respectivamente SFCR III, SFCR I e SFCR II. Sabe-se que a função desse indicador é também verificar o desempenho do sistema fotovoltaico, a partir daí, pode-se afirmar que ambos sistemas estão com ótimos desempenhos. E por último não menos importante, o PR, como foi visto no capítulo 2, o valor acima de 75% implica um sistema fotovoltaico eficiente, com excelente rendimento e poucos períodos de falhas ou desligamentos. O SFCR III ficou com um melhor percentual em relação aos demais, e também acima do valor padrão, porém os outros sistemas ficaram um pouco abaixo do padrão mas sem impactos significantes.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho, foi possível enxergar a importância dos índices de mérito em SFV, assim como outros parâmetros e indicadores que contribuem significativamente para eficiência desses sistemas. Inicialmente, estuda-se alguns conceitos sobre irradiação, ângulos de azimute, inclinação solar, os quais serviram de base sólida para um melhor entendimento do tema.

Posteriormente, foi possível avaliar individualmente cada sistema deste trabalho enfatizando a geração de energia, o FC, YR e PR bem como as perdas de cada sistema. Através dos índices de mérito é pode-se diagnosticar o que pode estar ocorrendo no sistema fotovoltaico. As análises desses parâmetros são essenciais para a compreensão e determinação de perdas ocorridas, assim como as falhas nos sistemas, isso possibilita a otimização dos SFCR's e maximiza a eficiência de novos sistemas tornando-os mais confiáveis.

A partir de comparações dos indicadores destacam-se alguns pontos dos sistemas analisados, como por exemplo, perdas LC e LS, geração prevista, geração produzida entre outros, e ainda nesse contexto pode-se levar em consideração, os dados simulados pelo software PVsyst. Após o levantamento destes dados foi possível comparar os valores dos 3 sistemas em análise ao longo de 12 meses do ano de 2023.

Uma outra questão muito importante é o PR do SFCR I e SFCR II que ficaram abaixo de 70%, isso já faz acender um sinal de alerta para os sistemas, pois diversas causas podem estar contribuindo para este fator estar abaixo do padrão de um bom funcionamento, tais como as perdas no campo fotovoltaico e no inversor, bem como a sujeira nos módulos que são de extrema relevância.

Por fim, foi possível avaliar a eficiência de cada sistema analisado, considerando uma alta pontuação no índice de mérito traduz um sistema bem dimensionado e produtivo. Assim, estes índices são cruciais para otimização e garantia de eficácia dos sistemas fotovoltaicos.

O desenvolvimento deste trabalho evidenciou a necessidade de trabalhos futuros na área, como a realização da mesma análise ao longo de um ano completo em outra região do país, como a região Sul, em vez da região Centro-Oeste.

Outra possibilidade seria comparar os índices de mérito de sistemas fotovoltaicos instalados em regiões distintas, mas com a mesma potência em kWp. Além disso, seria válido analisar sistemas com orientação para o Sul geográfico e para o Norte geográfico, comparando-os para destacar a importância dos índices de mérito em SFV.

REFERÊNCIAS

- [1] FARIA, M. F. – **Análise comparativa de índices de mérito entre seis microgeradores fotovoltaicos de 270 Wp instalados no Instituto Federal de Goiás câmpus Itumbiara.** Itumbiara: IFG, 2019 – Trabalho de Conclusão de Curso.
- [2] Pereira, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2 ed. São José dos Campos, 2017.
- [3] ABSOLAR - **Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>> Acesso em 04 de Março de 2024.
- [4] GLOBAL MARKET OUTLOOK. **Valor Econômico – Globo.** Disponível em <https://valor.globo.com/mundo/noticia/2022/05/22/energia-solar-alcanca-marca-historica-no-mundo.ghtml>> Acesso em 05 de Março de 2024.
- [5] ABSOLAR - **Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em <<https://www.pv-magazine-brasil.com/2023/02/14/ranking-de-estados-com-maior-capacidade-instalada-de-gd/>> Acesso em 07 de Março de 2024.
- [6] Pereira, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª edição.** São José dos Campos, 2017.
- [7] SILVA, S. B. **Notas de aulas da disciplina: Fontes Convencionais e Renováveis de Energia,** Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Goiás, Itumbiara, 2018.
- [8] Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030: Geração de Energia Elétrica a partir de Outras Fontes.** Brasil, MME, EPE, 2007.
- [9] **CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E ÉOLICA SERGIO DE SALVO BRITO – CRESESB.** Energia Solar princípios e Aplicações. Disponível em: <

http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf > Acesso em: 12 de Março de 2024.

[10] Almeida. E., et al. **Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica, 2015**. Artigo publicado na Revista Engenharias Online da Universidade Fumec. Disponível em < <http://fumec.br/revistas/eol/article/view/3574/1911> > Acesso em: 14 de Março de 2024.

[11] **NEOSOLAR – Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica e Seus Componentes**. Disponível em: < <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes> > Acesso em: 15 de Março de 2024.

[12] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL – **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição, Rev. nº 724/2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99> Acesso em: 20 de Março de 2024.

[13] CARNEIRO, J. – **Módulos Fotovoltaicos Características e Associações**. Portugal, Universidade do Minho Campus Azurém, 2010.

[14] SOUZA, R. S. - **BlueSol – Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica**. Ribeirão Preto.

[15] PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. - **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

[16] FUSANO, R. H. **Análise Dos Índices de Mérito do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede do Escritório Verde da UTFPR**. Curitiba: UTFPR, 2013 – Trabalho de Conclusão de Curso.

[17] BENEDITO, R. S. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por Meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**. São Paulo: USP, 2009 (Pós-Graduação em Energia).

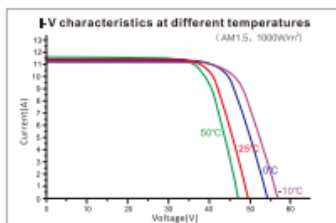
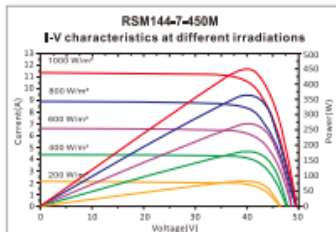
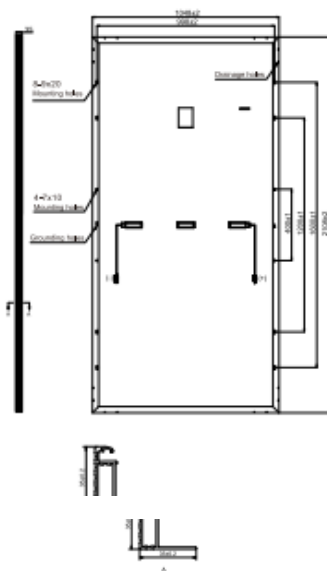
- [18] MELLO, Arthur Durigon. **Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede a partir da determinação de índices de mérito**. 2016. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Araranguá, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/164812/TCC%20%20Vers%C3%A3o%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 20 de maio de 2024.
- [19] MOREIRA, A. DOS R.; MOREIRA, B. L. P.; SILVEIRA, C. DE O. **Estudo de viabilidade da geração distribuída por sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2017.
- [20] Júnior, A. M. et al. **Análise de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos com Diferentes Ângulos de Inclinação e Azimute Localizados em Palmas - TO**. UFT, UFMG, IFG, 2016 – Artigo Científico.
- [21] Coordenadas Geográficas de Mineiros, Goiás – Go. Disponível em <<https://www.geografos.com.br/cidades-goias/mineiros.php>> Acessado em 12 Junho de 2024.
- [22] CRESEB.CEPEL – **Potencial Solar, SunData v3.0** – Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>> Acessado em 12 de Julho de 2024.
- [23] KUMAR, N. M. et al. Performance analysis of 100 kWp grid connected Si-poly photovoltaic system using PVsyst simulation tool. Energy Procedia, v. 117, p. 180–189, 2017.

ANEXO A – DATASHEET MÓDULOS

SFCR I - Módulo Risen 450W



Dimensions of PV Module



ELECTRICAL DATA (STC)

Model Number	RSM144-7-435M	RSM144-7-440M	RSM144-7-445M	RSM144-7-450M	RSM144-7-455M
Rated Power in Watts-Pmax(Wp)	435	440	445	450	455
Open Circuit Voltage-Voc(V)	49.40	49.50	49.60	49.70	49.80
Short Circuit Current-Isc(A)	11.20	11.30	11.40	11.50	11.60
Maximum Power Voltage-Vmpp(V)	41.05	41.13	41.25	41.30	41.40
Maximum Power Current-Imp(A)	10.60	10.70	10.80	10.90	11.00
Module Efficiency (%) *	19.7	19.9	20.1	20.4	20.6

STC: Irradiance 1000 W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5 according to EN 60904-3.
* Module Efficiency (%): Round-off to the nearest number

ELECTRICAL DATA (NMOT)

Model Number	RSM144-7-435M	RSM144-7-440M	RSM144-7-445M	RSM144-7-450M	RSM144-7-455M
Maximum Power-Pmax (Wp)	325.2	329.6	333.9	338.2	342.5
Open Circuit Voltage-Voc (V)	45.45	46.18	46.39	46.43	46.61
Short Circuit Current-Isc (A)	9.18	9.27	9.35	9.43	9.51
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	37.60	37.80	37.90	38.00	38.10
Maximum Power Current-Imp (A)	8.65	8.72	8.81	8.90	8.99

NMOT: Irradiance at 800 W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

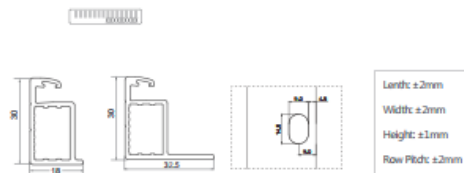
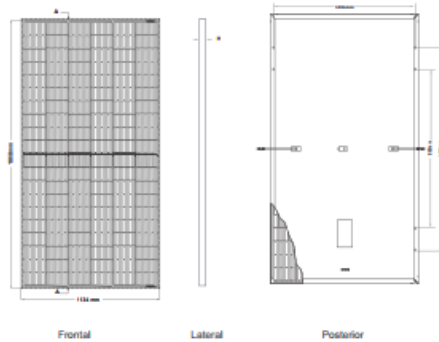
Solar cells	Monocrystalline 166×83mm
Cell configuration	144 cells (6×12+6×12)
Module dimensions	2108×1048×35mm
Weight	24.5kg
Superstrate	High Transmission, Low Iron, Tempered ARC Glass
Substrate	White Back-sheet
Frame	Anodized Aluminium Alloy type 6063-T5, Silver Color
J-Box	Potted, IP68, 1500VDC, 3 Schottky bypass diodes
Cables	4.0mm² (12AWG), Positive(+)350mm, Negative(-)350mm (Connector Included)
Connector	Risen Twinsel PV-SY02, IP68

TEMPERATURE & MAXIMUM RATINGS

Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	44°C±2°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.29%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.05%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.37%/°C
Operational Temperature	-40°C~+85°C
Maximum System Voltage	1500VDC
Max Series Fuse Rating	20A
Limiting Reverse Current	20A

SFCR II – Módulo Jinko 450W

Desenhos de engenharia



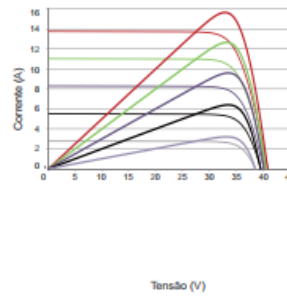
Configuração de Embalagem

(Dois pallets = Uma paleta)

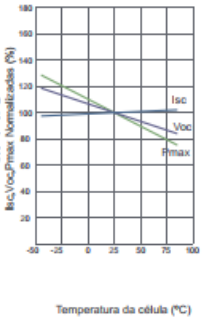
35 pcs/pallets, 70 pcs/pilha, 840 pcs/Container de 40'HQ

Performance Elétrica & Dependência com Temperatura

Curvas de corrente-tensão de potência-tensão o (430 W)



Dependência de temperatura de Isc, Voc, Pmax



Características Mecânicas

Tipo de Célula	P-Type Monocristalina
N.º de células	120 (2x60)
Dimensões	1868×1134×30mm (73,54×44,65×1,18 polegadas)
Peso	24,2 kg (53,35 lb)
Vidro Dianteiro	3,2 mm, Revestimento antirreflexo, transmissão, baixo teor de ferro, vidro temperado
Moldura	Liga de alumínio anodizado
Caixa de Junção	Classificação IP68
Cabos de Saída	Cabos de saída (+) 290 mm, (-) 145 mm ou comprimento personalizado

ESPECIFICAÇÕES

Tipo de módulo	JKM430M-6TL4		JKM435M-6TL4		JKM440M-6TL4		JKM445M-6TL4		JKM450M-6TL4	
	JKM430M-6TL4-V		JKM435M-6TL4-V		JKM440M-6TL4-V		JKM445M-6TL4-V		JKM450M-6TL4-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Potência Máxima (Pmax)	430Wp	320Wp	435Wp	324Wp	440Wp	327Wp	445Wp	331Wp	450Wp	335Wp
Tensão de potência máxima (Vmp)	33.47V	31.21V	33.65V	31.37V	33.82V	31.53V	34.00V	31.69V	34.17V	31.86V
Corrente de potência máxima (Imp)	12.85A	10.25A	12.93A	10.32A	13.01A	10.38A	13.09A	10.45A	13.17A	10.51A
Tensão de circuito aberto (Voc)	40.57V	38.29V	40.75V	38.46V	40.92V	38.62V	41.10V	38.79V	41.27V	38.95V
Corrente de curto-circuito (Isc)	13.53A	10.93A	13.61A	10.99A	13.69A	11.06A	13.77A	11.12A	13.85A	11.19A
Eficiência do módulo STC (%)	20.30%		20.54%		20.77%		21.01%		21.24%	
Temperatura de operação (°C)	-40°C~+85°C									
Tensão máxima do sistema	1000/1500VDC (IEC)									
Classificação máxima de fusíveis em série	25A									
Tolerância de potência	0~+3%									
Coefficientes de temperatura de Pmax	-0.35%/°C									
Coefficientes de temperatura de Voc	-0.28%/°C									
Coefficientes de temperatura de Isc	0.048%/°C									
Temperatura operacional nominal da célula (NOCT)	45±2°C									

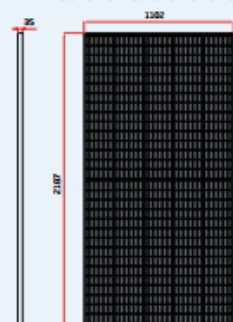
STC: Irradiância 1000 W/m² Temperatura da célula 25°C AM=1.5

NOCT: Irradiância 800 W/m² Temperatura ambiente 20°C AM=1.5 Velocidade do vento 1 m/s

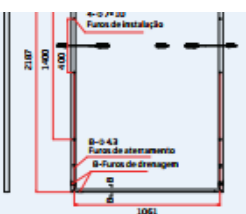
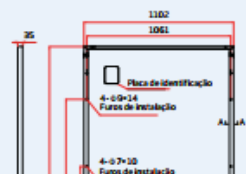


MÓDULO MONOCRISTALINO MONOFACIAL

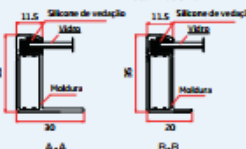
DIMENSÕES DO MÓDULO FOTOVOLTAICO (mm)



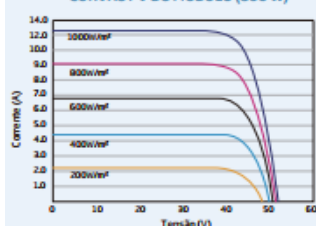
Vista Frontal



Vista Traseira



CURVAS I-V DO MÓDULO (500 W)



CURVAS P-V DO MÓDULO (500W)



DADOS ELÉTRICOS (STC)

Potência de Pico - P_{max} (Wp)*	485	490	495	500	505	510
Tolerância de Potência - P_{max} (W)	0 ~ +5					
Tensão Máxima - V_{mp} (V)	42.2	42.4	42.6	42.8	43.0	43.2
Corrente Máxima - I_{mp} (A)	11.49	11.56	11.63	11.69	11.75	11.81
Tensão de Circuito Aberto - V_{oc} (V)	51.1	51.3	51.5	51.7	51.9	52.1
Corrente de Curto Circuito - I_{sc} (A)	12.07	12.14	12.21	12.28	12.35	12.42
Eficiência do Módulo η_m (%)	20.1	20.3	20.5	20.7	21.0	21.2

STC: Irradiação 1000W/m², Temperatura de Célula 25°C, Massa de Ar AM1.5. *Tolerância de Medida: ±3%.

DADOS ELÉTRICOS (NOCT)

Potência de Pico - P_{max} (Wp)	365	369	373	377	381	385
Tensão Máxima - V_{mp} (V)	39.9	40.0	40.2	40.4	40.6	40.5
Corrente Máxima - I_{mp} (A)	9.17	9.22	9.28	9.33	9.38	9.50
Tensão de Circuito Aberto - V_{oc} (V)	48.1	48.2	48.4	48.6	48.8	49.0
Corrente de Curto Circuito - I_{sc} (A)	9.73	9.78	9.84	9.90	9.95	10.01

NOCT: Irradiação 800 W/m², Temperatura Ambiente 20°C, Velocidade do Vento 1 m/s

DADOS MECÂNICOS

Células	Monocristalinas
No. de Células	150 células
Dimensões do módulo	2187×1102×35 mm (86.10×43.39×1.38 polegadas)
Peso	26.3 kg (58.0 lb)
Vidro	3.2 mm (0.13 polegadas), Alta Transmissão, Anti-Reflexo e Recobrimento Térmico
Material Encapsulante	EVA/POE
Backsheet	Branco
Moldura	35 mm (1.38 polegadas) Liga de Alumínio Anodizado
Caixas de Junção	IP 68
Cabos	Cabo de Tecnologia Fotovoltaica 4.0mm ² (0.006 polegadas ²) Retrato: 280/280 mm (11.02/11.02 polegadas) Comprimento customizável
Conectores	MC4 EQV2 / TS4 *

*Verificar conector com o vendedor local.

COEFICIENTES DE TEMPERATURA

NOCT (Temperatura Nominal de Operação do Celula)	43°C (±2°C)
Coefficiente de Temperatura P_{max}	- 0.34%/°C
Coefficiente de Temperatura V_{oc}	- 0.25%/°C
Coefficiente de Temperatura I_{sc}	0.04%/°C

LIMITES DE OPERAÇÃO

Temperatura Operacional	-40~+85 °C
Tensão Máxima do Sistema	1500V DC (IEC) 1500V DC (UL)
Capacidade Máx. do Fusível em Série	20A



CUIDADO: LEIA AS INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA E INSTALAÇÃO ANTES DE USAR O PRODUTO.

© 2022 Trina Solar Co., Ltd. Todos os direitos reservados. As especificações incluídas nesta folha de dados estão sujeitas a alterações sem aviso prévio.

Número da versão: TSM_EN_2022_A

www.trinasolar.com

ANEXO B – DATASHEET INVERSORES

SFCR I e SFCR III - Inversor WEG 5kW

www.weg.net



Inversor String Monofásico SIW200G

A linha SIW200G tem o foco no segmento residencial, é competitiva, versátil e segura, além da topologia robusta e do uso da convecção natural que conferem baixa manutenção e durabilidade. Atende às principais normas de segurança para sistemas fotovoltaicos, assim como de conexão às redes brasileiras.



Especificações técnicas	SIW200G M030	SIW200G M050	SIW200G M060	SIW200G M070
Eficiência				
Eficiência máxima	97,4%	97,4%	97,4%	97,8%
Entrada				
Tensão de entrada máxima	600 V	600 V	600 V	600 V
Faixa de operação do MPPT	80 V ~ 550 V	80 V ~ 550 V	80 V ~ 500 V	80 V ~ 500 V
Tensão de partida	120 V	120 V	120 V	120 V
Corrente de entrada máxima/MPPT	14 A	14 A	14 A	14 A
Corrente de curto-circuito máxima	18 A	18 A	18 A	18 A
Número de MPPTs	2	2	2	3
Número máximo de entradas por MPPT	1	1	1	1
Saída CA				

Conexão à rede	Monofásica	Monofásica	Monofásica	Monofásica
Potência nominal de saída	3.000 W	5.000 W	6.000 W	7.000 W
Potência aparente máxima	3.300 VA	5.500 VA	6.000 VA	7.700 VA
Tensão de saída nominal	220 V	220 V	220 V	220 V
Frequência de rede CA nominal	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz
Corrente de saída máxima	14,3 A	23,9 A	26,1 A	35 A
Fator de potência ajustável	0,8 adiantado/ 0,8 atrasado	0,8 adiantado/ 0,8 atrasado	0,8 adiantado/ 0,8 atrasado	0,8 adiantado/ 0,8 atrasado
Distorção harmônica total máxima	≤3%	≤3%	≤3%	≤3%
Proteção				
Proteção anti-ilhamento	Sim	Sim	Sim	Sim
Proteção contra polaridade CC invertida	Sim	Sim	Sim	Sim
Monitoramento da isolação	Sim	Sim	Sim	Sim
Supressor de surto CC / CA	Sim	Sim	Sim	Sim
Monitoramento de correntes residuais	Sim	Sim	Sim	Sim
Proteção contra sobrecorrente CA	Sim	Sim	Sim	Sim
Proteção contra curto-circuito CA	Sim	Sim	Sim	Sim
Proteção contra sobretensão CA	Sim	Sim	Sim	Sim
Proteção contra sobretemperatura	Sim	Sim	Sim	Sim
Dados gerais				

Faixa de temperatura de operação	-20 a +60 °C	-20 a +60 °C	-20 a +60 °C	-20 a +60 °C
Umidade relativa de operação	0% RH ~ 100% RH	0% RH ~ 100% RH	0% RH ~ 100% RH	0% RH ~ 100% RH
Altitude de operação	0 ~ 3.000 m	0 ~ 3.000 m	0 ~ 3.000 m	0 ~ 3.000 m
Resfriamento	Convecção natural	Convecção natural	Convecção natural	Convecção natural
Display	Tela LCD, teclas touch	Tela LCD, teclas touch	Tela LCD, teclas touch	Tela LCD, teclas touch
Comunicação	RS485, Wi-Fi	RS485, Wi-Fi	RS485, Wi-Fi	RS485, Wi-Fi
Peso (incluindo suporte de montagem)	15,5 kg	15,5 kg	15,5 kg	19 kg
Dimensão (incluindo suporte de montagem)	402 x 476,5 x 148 mm	402 x 476,5 x 148 mm	402 x 476,5 x 148 mm	440 x 380 x 167 mm
Grau de proteção	IP65	IP65	IP65	IP65
Modo de operação	On-Grid	On-Grid	On-Grid	On-Grid
Conformidade com normas				
Segurança	EN/IEC 62109-1, EN/IEC 62109-2, IEC 61000-6-1 / IEC 61000-6-2 / IEC 61000-6-3	EN/IEC 62109-1, EN/IEC 62109-2, IEC 61000-6-1 / IEC 61000-6-2 / IEC 61000-6-3	EN/IEC 62109-1, EN/IEC 62109-2, IEC 61000-6-1 / IEC 61000-6-2 / IEC 61000-6-3	EN/IEC 62109-1, EN/IEC 62109-2, IEC 61000-6-1 / IEC 61000-6-2 / IEC 61000-6-3
Normas de conexão à rede	ABNT NBR 16149 / ABNT NBR 16150 / ABNT NBR IEC 62116 / AS 4777.2-2015 / G98-1 / G99-1 / EN 50549-1 / IEC 61727	ABNT NBR 16149 / ABNT NBR 16150 / ABNT NBR IEC 62116 / AS 4777.2-2015 / G98-1 / G99-1 / EN 50549-1 / IEC 61727	ABNT NBR 16149 / ABNT NBR 16150 / ABNT NBR IEC 62116 / AS 4777.2-2015 / G98-1 / G99-1 / EN 50549-1 / IEC 61727	ABNT NBR 16149 / ABNT NBR 16150 / ABNT NBR IEC 62116 / AS 4777.2-2015 / G98-1 / G99-1 / EN 50549-1 / IEC 61727

Nota: garantia de 7 anos.

SFCR II – Inversor GROWATT 3kW

Ficha de dados	MIC 1000TL-X	MIC 1500TL-X	MIC 2000TL-X	MIC 2500TL-X	MIC 3000TL-X
Dados de entrada					
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulo STC)	1400W	2100W	2800W	3500W	4200W
Máxima tensão CC	500V	500V	500V	550V	550V
Tensão de partida	50V	50V	50V	80V	80V
Faixa de tensão MPPT/tensão nominal	50V-500V /180V	50V-500V /250V	50V-500V /360V	65V-550V /360V	65V-550V /360V
Máxima corrente de entrada por trackers MPPT	13A				
Máxima corrente curto-circuito por trackers MPPT	16A				
Número de MPPT / strings por MPPT	1/1				
Saída (CA)					
Potência nominal de saída	1000W	1500W	2000W	2500W	3000W
Potência aparente máxima de CA	1000VA	1500VA	2000VA	2500VA	3000VA
Máxima corrente de saída	4,8A	7,1A	9,5A	11,9A	14,3A
Tensão nominal de saída(faixa)	230V(180Vac-280Vac)				
Frequência da rede CA(Faixa)	50Hz/60Hz ± 5Hz				
Fator de potência ajustável	0.8I-0.8c				
THDI	<3%				
Conexão CA	Fase única				
Eficiência					
Máx. eficiência	97.4%	97.4%	97.4%	97.6%	97.6%
Euro-eta	96.5%	97.0%	97.0%	97.0%	97.1%
Dispositivos de proteção					
Proteção de polaridade reversa de CC	Sim				
Interruptor CC	Sim				
Varistor para proteção de surtos CC	Sim				
Monitoramento de resistência de isolamento	Sim				
Varistor para proteção de surtos CA	Sim				
Monitoramento de falha de terra	Sim				
Monitoramento de rede	Sim				
Proteção anti-ilhamento	Sim				
Unidade de monitoramento de corrente residual	Sim				
Dados Gerais					
Dimensões (L/A/P)	274/254/138mm				
Peso	6.0kg	6.0kg	6.0kg	6.2kg	6.2kg
Faixa de temperatura operacional	- 25°C ... +60°C (>45°C Derating)				
Emissão de ruído	≤25 dB(A)				
Altitude	4000m(13123ft)				
Consumo naturo	< 0.5 W				
Topologia	Sem transformador				
Resfriamento	Convenção natural				
Grau de proteção	IP65				
Humidade relativa	100%				
CE, CEI0-21, VDE-AR-N4105, VDE0126-1-1, UTE C 15-712-1, EN50549, IEC60068, IEC61683, IEC62116, IEC61727 INMETRO, G98, C10/C11, AS4777, AS/NZS3100, UNE217001, UNE206007, PO12.2					

GROWATT NEW ENERGY TECHNOLOGY Co.,LTD A: No.28 Guangming Road, Longteng Community, Shiyao, Baoan District, Shenzhen, P.R.China.
T: + 86 755 2747 1900 F: + 86 755 2749 1460 E: info@ginverter.com