

Edson Júnior Frota Silva
Matheus Henrique Dias

**Simulação do Desempenho de Inversor de Frequência para
Sistema Fotovoltaico**

Goiânia
2021

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Edson Júnior Frota Silva; Matheus Henrique Dias

Título do trabalho: Simulação do Desempenho de Inversor de Frequência para Sistema Fotovoltaico

2. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

Independente da concordância com a disponibilização eletrônica, é imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.

Edson Júnior Frota da Silva, Matheus Henrique Dias
Assinatura(a) do(a)(s) autor(a)(es)(as)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 28/05/2021

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: (a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

² As assinaturas devem ser originais sendo assinadas no próprio documento, imagens coladas não serão aceitas.

Edson Júnior Frota Silva

Matheus Henrique Dias

Simulação do Desempenho de Inversor de Frequência para Sistema Fotovoltaico

Trabalho de conclusão de curso apresentado na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação como requisito para a conclusão do curso de Engenharia de Computação e obtenção do grau de Engenheiro de Computação.

Universidade Federal de Goiás – UFG

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação (EMC)

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Prof. Dr. Euler Bueno dos Santos

Goiânia

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Silva, Edson Júnior Frota

Simulação do Desempenho de Inversor de Frequência para Sistema Fotovoltaico [manuscrito] / Edson Júnior Frota Silva, Matheus Henrique Dias. - 2021.

Ixxii, 72 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Euler Bueno dos Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia da Computação, Goiânia, 2021.

Bibliografia. Anexos.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Energia Solar. 2. Sistema Fotovoltaico. 3. Energia Elétrica. 4. Radiação. 5. Inversor de frequência. I. Dias, Matheus Henrique. II. Santos, Euler Bueno dos, orient. III. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

Curso

() Eng Elétrica	() Eng Mecânica	(X) Eng Computação PFC 1 () PFC 2 (X)
------------------	------------------	---

Título do Trabalho

Simulação do Desempenho de Inversor de Frequência para Sistema Fotovoltaico

Banca Avaliadora

Membro 1	Euler Bueno dos Santos
Membro 2	Cacilda de Jesus Ribeiro
Membro 3	Reinaldo Gonçalves Nogueira

Discente

Matrícula	Nome
201515412	Edson Júnior Frota da Silva
201602472	Matheus Henrique Dias

NOTAS

Matrícula	Membro 1			Membro 2			Membro 3			Média*
	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	
201515412	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
201602472	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

NPT – Nota plano de trabalho; NTE – Nota do trabalho escrito; NAA – Nota de apresentação e arguição

Para Eng. Elétrica, Mecânica e PFC2 da Eng. Da Computação: $NF = 0,1 \times NPT + 0,45 \times NTE + 0,45 \times NAA$

Para PFC1 da Eng. Da Computação: $NF = 0,3 \times NPT + 0,7 \times NAA$

* A APROVAÇÃO DO(S) ALUNO(S) ESTÁ CONDICIONADA À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO FINAL AO ORINETADOR COM TODAS AS CORREÇÕES SUGERIDAS PELA BANCA.

OBSERVAÇÕES:

Preencher com modificações solicitadas, caso existam. Em caso de reprovação, informar a justificativa.

Documento assinado eletronicamente por **Cacilda De Jesus Ribeiro, Professor do Magistério Superior**, em 13/06/2021, às 16:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Euler Bueno dos Santos, Usuário Externo**, em 13/06/2021, às 17:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Reinaldo Gonçalves Nogueira, Professor do Magistério Superior**, em 13/06/2021, às 17:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2129138** e o código CRC **AA421851**.

Dedicamos este trabalho aos nossos pais, irmãos, familiares e amigos que sempre nos incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Ao nossos pais pelo apoio e incentivo que contribuíram para que pudéssemos alcançar nossos objetivos ao longo da graduação.

Aos nossos irmãos pela amizade e atenção dedicada sempre que precisamos.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Euler Bueno dos Santos pela confiança, atenção e respeito, agradecemos pelas valiosas contribuições e pelos sábios conselhos que sempre recebemos ao longo de todo o processo.

Agradecemos à Universidade Federal de Goiás e todo seu corpo docente que nos proporcionou inúmeras realizações pessoais, acadêmicas e profissionais ao longo de toda a graduação.

*“Concentre todos seus pensamentos na tarefa que está realizando.
Os raios de sol não queimam até que sejam colocados em foco.”*
(Alexander Graham Bell)

RESUMO

Os benefícios da energia solar são inúmeros, que vão desde a economia da conta de luz até a redução de impactos ambientais, uma vez que é uma fonte de energia renovável e limpa. Portanto, percebe-se que a energia solar tem um impacto tanto social quanto ambiental. Nesse sentido, o presente trabalho tem por finalidade estudar o princípio de funcionamento de uma pequena unidade geradora fotovoltaica conectada à rede elétrica. Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito dos principais componentes que compõem uma unidade geradora fotovoltaica. Posteriormente, foi realizado um estudo de caso cujo objetivo foi buscar uma solução para a inclusão de inversor de frequência fotovoltaico para constituir um sistema que pudesse ser instalado em uma das edificações da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Desse modo, foi escolhido o Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF). Foi escolhido onze módulos solares e um inversor para realizar a simulação e uma estimativa de custo para implantação do projeto. Em seguida, foi uma comparação de dados entre a estação meteorológica da EMC e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para tal procedimento, foi necessário realizar um minucioso tratamento de dados para verificar se o local estudado era propício para implantação de um sistema fotovoltaico e, também, para obter as temperaturas ambientes fornecida pela estação EMC. Em seguida, foi utilizado o programa Radasol 2 para calcular o a irradiância no plano inclinado e verificou-se, também, o ângulo que captava a maior irradiância solar. Após o processamento de dados da estação da EMC e do Radasol 2, foi calculada a potência média fornecida tanto pelo gerador fotovoltaico quanto pelo inversor. Finalmente, foi realizada uma estimativa da quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico para o ano estudado e o tempo necessário para obter o retorno financeiro que foi investido inicialmente. Por meio deste estudo pode-se verificar que o desempenho do inversor de frequência é satisfatório e consegue atender às necessidades do subsistema que serviu como elemento para o objeto de estudo.

Palavras-chave: Energia solar, Sistema Fotovoltaico, Energia Elétrica, Radiação, Inversor de frequência.

ABSTRACT

The benefits of solar energy are numerous, ranging from saving energy bills to reducing environmental impacts since it is a renewable and clean energy source. Therefore, it is clear that solar energy has both a social and an environmental impact. In this sense, the present work aims to study the working principle of a small photovoltaic generating unit connected to the electrical grid. First, a literature review was carried out regarding the main components of a photovoltaic generating unit. A case study was carried out whose objective was to find a solution for the inclusion of a photovoltaic frequency inverter to constitute a system that could be installed in one of the buildings of the School of Electrical, Mechanical, and Computer Engineering (EMC) of the Federal University of Goiás (UFG). Thus, the Laboratory of Materials and Manufacturing Processes (LAMAF) was chosen. Eleven solar modules and one inverter were selected to perform the simulation and a cost estimate for project implementation. Next was a data comparison between the EMC meteorological station and the National Institute of Meteorology (INMET). For this procedure, it was necessary to carry out a thorough data treatment to verify if the studied location was suitable for implementing a photovoltaic system and, also, to obtain the ambient temperatures provided by the EMC station. Then, the Radiasol 2 program was used to calculate the irradiance on the inclined plane, and the angle that captured the greatest solar irradiance was also verified. After processing station data from EMC and Radiasol 2, the average power supplied by both the photovoltaic generator and the inverter was calculated. Finally, an estimate was made of the amount of energy generated by the photovoltaic system for the year studied and the time needed to obtain the financial return that was initially invested. It can be verified, through this study, the performance of the frequency inverter is satisfactory and manages to meet the needs of the subsystem that served as an element for the object of study.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic System, Electricity, Radiation, Frequency Inverter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz energética brasileira (2021).....	21
Figura 2 - Movimento diurno do sol.....	28
Figura 3 - Posições do sol na eclíptica	29
Figura 4 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino	30
Figura 5 - SFCR instalado em uma residência	31
Figura 6 - Sistema <i>on-grid</i>	33
Figura 7 - Sistema <i>off-grid</i>	34
Figura 8 - Sistema híbrido	35
Figura 9 - Inclinação do telhado do LAMAF	40
Figura 10 - Módulo solar CanadianSolar Hiku CS3L.....	41
Figura 11 - Inversor Fronius Primo 3.0-1 3 kWp.....	42
Figura 12 - Interface do programa Radiasol 2.....	44
Figura 13 - Inserção de dados iniciais no Radiasol 2	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Radiações das estações da EMC e INMET (06/01/2020).....	48
Gráfico 2 - Radiações das estações da EMC e INMET (03/02/2020).....	49
Gráfico 3 - Radiações das estações da EMC e INMET (20/03/2020).....	49
Gráfico 4 - Radiações das estações da EMC e INMET (10/04/2020).....	49
Gráfico 5 - Radiações das estações da EMC e INMET (01/05/2020).....	50
Gráfico 6 - Radiações das estações da EMC e INMET (23/06/2020).....	50
Gráfico 7 - Radiações das estações da EMC e INMET (16/07/2020).....	50
Gráfico 8 - Radiações das estações da EMC e INMET (06/08/2020).....	51
Gráfico 9 - Radiações das estações da EMC e INMET (04/09/2020).....	51
Gráfico 10 - Radiações das estações da EMC e INMET (05/10/2020).....	51
Gráfico 11 - Radiações das estações da EMC e INMET (27/11/2020).....	52
Gráfico 12 - Radiações das estações da EMC e INMET (16/12/2020).....	52
Gráfico 13 - Irradiação média anual no plano inclinado (2020).....	54
Gráfico 14 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de fevereiro de 2020 ...	63
Gráfico 15 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de maio de 2020.....	63
Gráfico 16 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de junho de 2020.....	63
Gráfico 17 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de outubro de 2020	64
Gráfico 18 - Energia elétrica média mensal (2020).....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Preço médio de instalação (módulo solar e equipamento) para residências.....	36
Tabela 2 - Preço médio de instalação e equipamento para comércios	37
Tabela 3 - Preço médio de instalação e equipamento para indústrias	37
Tabela 4 - Especificações técnicas inversor Fronius Primo 3.0-1 3kWp	42
Tabela 5 - Potência média horária do gerador fotovoltaico para o mês de fevereiro de 2020 ..	55
Tabela 6 - Potência média horária do gerador fotovoltaico para o mês de maio de 2020.....	56
Tabela 7 - Potência média horária do gerador fotovoltaico para o mês de junho de 2020.....	57
Tabela 8 - Potência média horária do gerador fotovoltaico para o mês de outubro de 2020 ...	58
Tabela 9 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de fevereiro de 2020.....	59
Tabela 10 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de maio de 2020	60
Tabela 11 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de junho de 2020	61
Tabela 12 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de outubro de 2020.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBIE	Centro Brasileiro de Infraestrutura
CLP	Controlador Lógico Programável
EMC	Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação
FDI	Fator de dimensionamento do inversor
HSP	Horas de sol pleno
IES	Instituição de Ensino Superior
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IR	Raios Infravermelhos
LABSOL	Laboratório de Energia Solar
LAMAF	Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
UFG	Universidade Federal de Goiás
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UV	Raios Ultravioletas
UVA	Raios Ultravioletas A
UVB	Raios Ultravioletas B
UVC	Raios Ultravioletas C
VI	Raios visíveis

LISTA DE SÍMBOLOS

α	inclinação do plano (graus)
c.c	corrente contínua (A)
c.a	corrente alternada (A)
η_{SPMP}	eficiência de seguimento do ponto de máxima potência do inversor
γ_{mp}	coeficiente de temperatura do ponto de máxima potência
H_{ref}	irradiância de referência (W/m ²)
$H_{t,\beta}$	irradiância incidente no plano gerador e β é a inclinação do plano (W/m ²)
P_{FV}	potência ativa entregue ao inversor (W)
P_{FV}^0	potência nominal do gerador fotovoltaico (W)
P_{INV}^0	potência nominal do inversor (W)
$P_{INV}^{máx}$	potência máxima do inversor (W)
P_{mp}	máxima potência do gerador fotovoltaico (W)
$P_{saída}$	potência de saída do inversor (W)
P_{perdas}	perdas envolvidas no processo de conversão c.c./c.a. do inversor (W)
T_a	temperatura ambiente (°C)
T_c	temperatura de operação da célula (°C)
$T_{c,ref}$	temperatura nas condições de referência (°C)
T_{NOC}	temperatura nominal de operação da célula (°C)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	7
RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE GRÁFICOS	12
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	15
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
1.3 JUSTIFICATIVA	20
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 ATMOSFERA TERRESTRE	23
2.1.1 Característica da Atmosfera	23
2.2 RADIAÇÃO SOLAR	23
2.2.1 Tipos de Radiação Solar	25
2.2.2 Importância da radiação solar	25
2.2.3 Radiação Solar Difusa	26
2.2.4 Radiação solar incidente	26
2.2.5 Radiação solar refletida	26
2.2.6 Radiação solar absorvida	27
2.2.7 Medição de radiação global e difusa	27

2.2.8	Medição da Radiação Infravermelha	27
2.2.9	Movimento diurno do sol	28
2.2.10	Movimento Anual do Sol	28
2.3	EFEITO FOTOVOLTAICO	29
2.4	SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE	30
2.4.1	Funcionamento de um SFCR	31
2.5	SISTEMA <i>ON-GRID</i>	32
2.6	SISTEMA <i>OFF GRID</i>	33
2.7	SISTEMA HÍBRIDO	34
2.8	VANTAGENS DE DESVANTAGENS (SISTEMA <i>ON-GRID</i> E <i>OFF-GRID</i>)	35
2.9	CUSTO MÉDIO DE IMPLANTAÇÃO DE UM PAINEL SOLAR E EQUIPAMENTO	36
2.10	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	37
2.10.1	Inversor de frequência <i>on-grid</i>	38
2.10.2	Inversor de frequência <i>off-grid</i>	38
2.10.3	Inversor de frequência híbrido	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	EDIFICAÇÃO	40
3.2	MATERIAIS ESCOLHIDOS	41
3.3	COTAÇÃO DE PREÇOS	43
3.4	COMPARAÇÃO DE DADOS ENTRE ESTAÇÕES DA EMC E INMET	43
3.5	PROGRAMA COMPUTACIONAL	43
3.6	EQUACIONAMENTO	44
3.6.1	Temperatura de operação da célula	44
3.6.2	Máxima potência do gerador fotovoltaico	45
3.6.3	Potência de saída do SFCR	46
3.6.4	Fator de dimensionamento do inversor	47

4	RESULTADOS	48
4.1	COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DAS ESTAÇÕES EMC E INMET	48
4.2	PROGRAMA COMPUTACIONAL	53
4.3	POTÊNCIA DO GERADOR FOTOVOLTAICO	54
4.4	POTÊNCIA DE SAÍDA DO INVERSOR	58
4.5	ENERGIA ELÉTRICA GERADA	64
5	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS	67
	ANEXO A - Datasheet: Módulos solares	69
	ANEXO B - Datasheet: Inversor	71

1 INTRODUÇÃO

A energia solar é fundamental para a manter a vida na terra e seus benefícios são vários, que vão além de uma simples fonte de luz e calor. A energia gerada pelo sol é uma fonte de energia renovável que se torna cada vez mais promissora e indispensável para o desenvolvimento humano e sustentável.

Segundo Pinho e Galdino (2014), o sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. É a partir da energia do sol que se dá evaporação e a origem do ciclo das águas que possibilita o represamento e a geração de energia a partir das usinas hidrelétricas. A energia eólica é uma forma indireta de manifestação solar, uma vez que a radiação solar induz a circulação atmosférica em larga escala, causando vento. O petróleo, carvão e gás natural são gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, inicialmente, obtiveram do recurso solar a energia necessária ao seu desenvolvimento. Também é através da energia do sol que a matéria orgânica, como a cana de açúcar, realiza a fotossíntese e se desenvolve para, posteriormente, ser transformada em combustível nas usinas.

Dada a importância da energia solar, a implementação de um SFCR (Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede) é uma medida que visa não apenas a redução de gastos econômicos, mas também uma medida de redução de impacto ambiental.

Este Projeto Final de Curso é uma contribuição às atividades do projeto de extensão “Transferência de conhecimentos e criação do Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica, como estratégias na implementação das Novas Diretrizes Curriculares dos Cursos de Engenharia”, como material didático da área, a ser disponibilizado para a sociedade.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As questões de energia estão cada vez mais integradas ao contexto político e econômico global, especialmente as questões relacionadas à qualidade de vida humana e à sustentabilidade do planeta. Diante da demanda cada vez maior de energia, da preocupação com as questões ambientais e da busca por maior eficiência energética, faz-se necessário encontrar novas fontes de energia para diversificar a matriz energética do país e auxiliar no atendimento da demanda crescente, minimizando o impacto sobre o ambiente, tanto quanto possível.

Apesar de seu aumento significativo na geração de energia, a distribuição de eletricidade no Brasil é muito desigual, a maior parte da qual é usada por grandes indústrias e consumidores

residenciais acessíveis. Mesmo com as altas tarifas da eletricidade tradicional, no Brasil, atualmente o preço da energia gerada por sistemas fotovoltaicos permite apenas competir com a geração de energia tradicional em algumas áreas.

Falta de popularização para os sistemas fotovoltaicos inclui fatores técnicos, políticos e econômicos, acarretando que não se tornou foco de investimentos. É necessário mudar fundamentalmente a situação atual para que as gerações futuras ganhem receita e ganho com o uso de energia limpa, desenvolvimento sustentável para promover a proteção ambiental.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é aprimorar o conhecimento, por meio de um levantamento bibliográfico, sobre os elementos que compõem uma pequena unidade de geração de energia solar conectada à rede elétrica de distribuição. Com isso, será apresentada uma visão concisa sobre o sistema de geração de energia elétrica através de radiação solar, estabelecendo a possibilidade da inclusão de outros dispositivos que permitam a constituição de um sistema que possa ser instalado no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da Universidade Federal de Goiás.

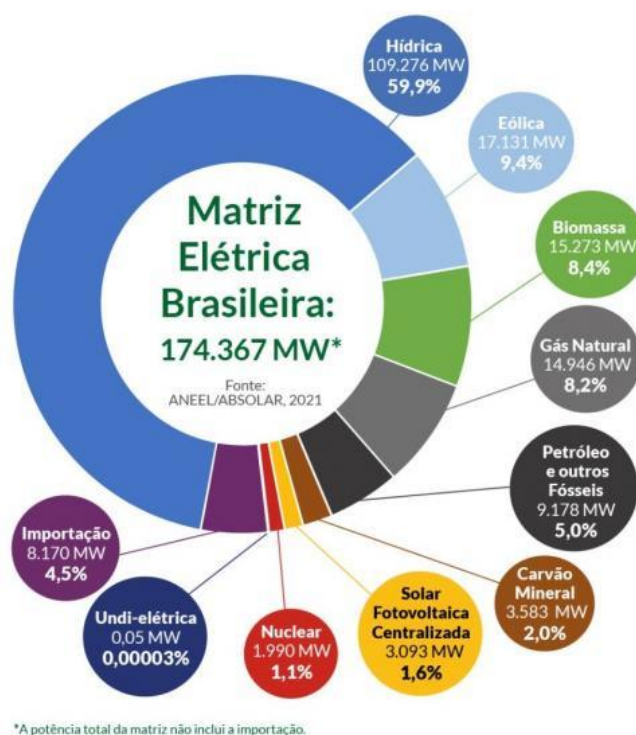
1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar conceitos relacionados ao sistema fotovoltaico conectado à rede;
- Avaliar o desempenho da simulação de um inversor de frequência para o sistema fotovoltaico em estudo.

1.3 JUSTIFICATIVA

A matriz energética brasileira (Figura 1) é bastante diversificada. No entanto, a produção de energia solar fotovoltaica ainda representa um percentual pequeno, correspondendo apenas 1,6% da produção nacional de energia.

Figura 1 - Matriz energética brasileira (2021)



Fonte: Anel/Absolar (2021)¹

Ainda que o Brasil tenha uma malha energética diversificada, alguns problemas ambientais impactam na produção de energia elétrica. A escassez de chuvas é o suficiente para gerar uma crise na matriz energética, uma vez que a energia produzida pelas usinas hidrelétricas representa 59,9% da produção nacional. Segundo Adriano Pires², fundador e diretor do CBIE (Centro Brasileiro de Infraestrutura), o Brasil enfrentará a terceira grande crise no segundo semestre de 2021, há pouca chuva, os reservatórios estão com 30% do nível, chegando a 20% em agosto e menos de 10% em outubro.

Nesse sentido, pensar em soluções alternativas, principalmente soluções renováveis, é de suma importância. Por isso, justifica-se o estudo de implantação de energia solar fotovoltaica, que vise não apenas uma solução para as adversidades que a matriz energética brasileira pode enfrentar futuramente, mas também uma forma de reduzir os gastos com energia elétrica na UFG.

¹ <https://fisenge.org.br/energia-solar-confea-envia-a-aneel-recomendacao-sobre-marco-regulatorio/>

² <https://www.infomoney.com.br/mercados/especialistas-falam-em-risco-de-apagao-energetico-veja-impactos-da-crise-de-energia-na-bolsa-e-na-economia/>

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica onde é abordada a atmosfera terrestre, rota do sol, radiação, irradiância no plano horizontal e inclinado, efeito fotovoltaico e suas características. Em seguida, é apresentado um estudo sobre o sistema fotovoltaico conectado à rede, seus componentes, uma breve comparação entre sistemas *on-grid*, *off-grid* e híbrido e o custo médio de instalação de um painel solar e equipamentos para residências, comércios e indústrias. Posteriormente, é apresentado um estudo sobre o inversor CC/CA, e alguns conceitos como: seguimento do ponto de máxima potência, perdas em relação ao percurso, fator de dimensionamento do inversor e as características de um inversor sistemas *on-grid*, *off-grid* e híbrido.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia abordada, incluindo os equipamentos escolhidos e sua cotação, os softwares necessários para realizar os processamentos de dados e o modelo matemático utilizado e suas respectivas equações.

No Capítulo 4 é apresentado os resultados das potências fornecidas pelos módulos solares e da potência de saída fornecida pelo inversor. Além disso, é apresentada a energia fornecida pelo sistema fotovoltaico e o tempo necessário para recuperar o valor investido na implantação do referido sistema.

Já o Capítulo 5 tem por objetivo apresentar as conclusões do referido trabalho.

Por fim, o presente trabalho é finalizado apresentando as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera da Terra corresponde a uma camada de ar em torno de toda a Terra, ajudando a sustentar a vida. É composta de gás que não se dissipa e é mantido pela gravidade. De acordo com o padrão da dinâmica da temperatura, a atmosfera terrestre é dividida em várias camadas (SOUZA, 2018).

2.1.1 Característica da Atmosfera

A atmosfera da Terra é composta de oxigênio, dióxido de carbono e nitrogênio e outros gases, que desempenham um papel importante, como proteger a Terra da radiação ultravioleta e danos aos organismos, manter a temperatura média da Terra e evitar grandes amplitudes térmicas entre dia e noite. Graças à atmosfera, pode haver vida na Terra. É importante notar que essa camada de gás não tem limite físico para identificá-la, pois à medida que a altitude aumenta, o gás fica cada vez mais fino (SOUZA, 2018).

No campo da climatologia, alguns estudiosos acreditam que não há limite para o limite superior da atmosfera na Terra, então o limitam a cerca de 100 quilômetros. No entanto, devido à ação da gravidade sobre os gases que constituem a atmosfera da Terra, ela pode atingir 10.000 quilômetros e, em seguida, mover-se para o espaço sideral (SOUZA, 2018).

2.2 RADIAÇÃO SOLAR

Segundo Planas (2015):

A radiação solar é a energia radiante emitida no espaço interplanetário do sol. Essa radiação é gerada a partir de reações de fusão nuclear que ocorrem no núcleo solar. A radiação nuclear produz radiação eletromagnética em várias frequências ou comprimentos de onda. A radiação eletromagnética se propaga no espaço à velocidade da luz.

A radiação é a transferência de energia através de ondas eletromagnéticas. A radiação ocorre diretamente da fonte de radiação para fora em todas as direções. Essas ondas não

precisam de um meio material para se propagar, pois podem viajar através do espaço interplanetário e alcançar a Terra a partir do sol.

O comprimento de onda e a frequência das ondas eletromagnéticas são importantes para determinar sua energia, visibilidade e penetração. Todas as ondas eletromagnéticas se movem a uma velocidade de 299.792 km/s no vácuo (PLANAS, 2015).

A radiação solar é distribuída em um amplo espectro com amplitude desigual em um formato de sino típico, que é o mesmo que o espectro do corpo negro de uma fonte solar simulada. Portanto, ele não se concentra em uma única frequência.

De acordo com a lei de Wien, a radiação máxima está concentrada na faixa de radiação ou luz visível, e o pico dessa radiação ou luz visível está localizado 500 nm fora da atmosfera terrestre, o que corresponde ao ciano (PLANAS, 2015).

A banda de radiação da fotossíntese oscila entre 400 e 700 nm, correspondendo à radiação visível, que equivale a 41% da radiação total. Dentro da radiação da fotossíntese, existem sub-bandas com radiação (PLANAS, 2015):

- azul-violeta (400 - 490 nm);
- verde (490 - 560 nm);
- amarelo (560 - 590 nm);
- vermelho alaranjado (590 - 700 nm);

Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar é afetada por vários graus de reflexão, refração, absorção e difusão de vários gases atmosféricos, dependendo da frequência. Portanto, o solo do espectro solar é irregular em comparação com o solo detectado pelo limiar externo da atmosfera onde existe uma faixa típica de absorção ou reflexão.

Devido às características da atmosfera da Terra, a radiação solar sofre certas alterações para atravessá-la e atingir a superfície.

De acordo com Planas (2015), a Terra recebe em média 1.366 W / m² (constante solar) do sol, que está relacionada ao limiar atmosférico e ao plano perpendicular aos raios solares recebidos: portanto, é necessário considerar que a radiação no sol Terra atinge o limite esférico de 1.440 minutos por dia, uma diminuição de 75%. Por sua vez, a atmosfera, como todo corpo, filtra os raios do sol até certo ponto, resultando em:

- Reflexão e dispersão de raios, devido ao albedo, às próprias nuvens e gases atmosféricos;

- De acordo com a lei de Wien, a absorção causa um aumento na temperatura, emitindo radiação em qualquer direção. No entanto, essa absorção é moderada na faixa de luz visível, tornando-a transparente à luz solar direta.

Cerca de metade da radiação solar atravessa a atmosfera inalterada. Essa radiação é chamada de radiação líquida. Em última análise, metade da radiação líquida contribui para a evaporação do corpo d'água, de modo que a energia solar disponível é responsável por cerca de um quarto da energia total de emissão (PLANAS, 2015).

A estratosfera absorve os raios ultravioleta na faixa de 200-300 nm (nanômetro), graças ao ozônio, e a troposfera absorve e difunde os raios infravermelhos devido ao vapor de água e ao CO₂. Nos comprimentos de onda ultravioleta quase mortais, o efeito de filtragem da banda é vital para o desenvolvimento da vida (PLANAS, 2015).

2.2.1 Tipos de Radiação Solar

Planas (2015) explica que a radiação do sol contém três tipos de raios:

- 49% são raios infravermelhos (IR) que fornecem calor;
- 43% são raios visíveis (VI) que fornecem luz;
- 7% são raios ultravioleta (UV);
- 1% são outros tipos de raios.

Por sua vez, os raios ultravioletas (UV) são subdivididos em três tipos:

- Ultravioleta A ou UVA: Eles passam facilmente pela atmosfera, atingindo toda a superfície da Terra;
- Ultravioleta B ou UVB: Comprimento de onda curto. Tem maior dificuldade para atravessar a atmosfera. Eles alcançam a zona equatorial mais facilmente do que em altas latitudes;
- Ultravioleta C ou UVC: Comprimento de onda curto. Eles não passam pela atmosfera. Eles são absorvidos pela camada de ozônio.

2.2.2 Importância da radiação solar

Planas (2015) ainda explica que a energia solar é a principal fonte de energia e, portanto, o motor que impulsiona o meio ambiente. A energia solar que recebemos através da radiação

solar é direta ou indiretamente responsável por aspectos tão importantes para a vida como: fotossíntese em plantas manter uma temperatura do planeta compatível com a vida. A energia solar que atinge a superfície da Terra é 10.000 vezes maior que a energia consumida atualmente por toda a humanidade.

2.2.3 Radiação Solar Difusa

A radiação difusa também é chamada de radiação indireta. A radiação difusa representa a porção de radiação solar que atinge pelo menos uma partícula de gases atmosféricos, alterando o ângulo de incidência e que, no entanto, atinge o solo porque é direcionado a ele. Aumenta em relação ao total em céu nublado. Em particular, a dispersão Rayleigh do componente azul da radiação solar é responsável pela cor azul do céu. Uma parte da radiação difusa está voltada para o espaço (PLANAS, 2015).

2.2.4 Radiação solar incidente

A radiação solar incidente é aquela que encontra algum obstáculo ao qual fornece toda ou parte de sua energia. Diz-se que a energia que não atinge a superfície da Terra está extinta e é composta de radiação reemitida, refletida e espalhada de volta no espaço. De acordo com a lei de Lambert, a quantidade de radiação que atinge a unidade de superfície é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência (PLANAS, 2015).

A quantidade máxima de radiação solar incidente é obtida com incidência perpendicular, uma vez que o ângulo aumenta, tanto a superfície afetada pela mesma quantidade de radiação quanto a espessura da atmosfera atravessada por esses aumentos. Isso cria as variações diárias, anuais e latitudinais na irradiação (PLANAS, 2015).

2.2.5 Radiação solar refletida

A radiação solar refletida é a parte da radiação solar incidente refletida na superfície da Terra devido ao efeito albedo. O albedo é o coeficiente de reflexão “c”. Os valores para c geralmente estão entre 0 e 1 ou expressos como uma porcentagem. É dada pela relação entre a energia radiante refletida de uma superfície em relação à energia incidente. A Terra tem um

valor médio de 40% ($c = 0,4$). Na altitude do albedo da Terra, adiciona-se ao espaço a radiação refletida pelas partículas atmosféricas (PLANAS, 2015).

2.2.6 Radiação solar absorvida

Depois de deduzir todas as perdas devido à reflexão e retro espalhamento da atmosfera e da superfície da Terra, a radiação solar incidente restante é absorvida pela superfície da Terra e, portanto, contribui para o seu aquecimento, de maneira variável dependendo da latitude e do tipo de superfície. Para medir a radiação solar, distingue-se três métodos, dependendo se é (PLANAS, 2015):

- Radiação solar direta;
- Radiação solar indireta;
- Radiação infravermelha.

2.2.7 Medição de radiação global e difusa

A radiação geral é definida como a radiação solar recebida de um ângulo sólido de 2π radianos cúbicos em uma superfície horizontal. A radiação global inclui a radiação recebida diretamente do disco solar, bem como a radiação espalhada do céu, que se espalha ao passar pela atmosfera. A radiação total é medida por um piranômetro. Para medir apenas o componente espalhado (difusa) da radiação solar, uma tela ou sistema de sombreamento pode ser usado para cobrir o componente direto (PLANAS, 2015).

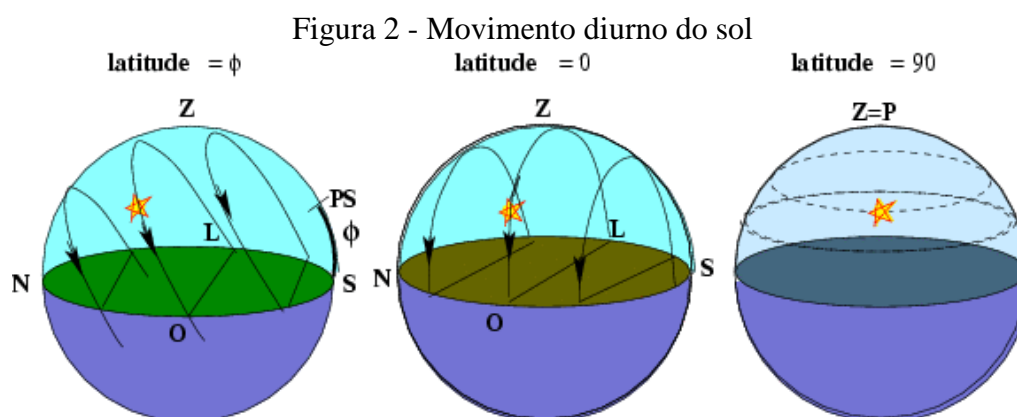
2.2.8 Medição da Radiação Infravermelha

A radiação infravermelha é medida por pirômetros. A maioria deles elimina comprimentos de onda curtos usando filtros que têm transparência constante em comprimentos de onda longos, sendo quase opacos em comprimentos de onda mais curtos (PLANAS, 2015).

2.2.9 Movimento diurno do sol

Como todas as outras estrelas, o movimento diurno do sol é de leste para oeste, uma vez que é reflexo do movimento de rotação da terra (que é de oeste para leste). O ponto em que o sol nasce do horizonte leste e o ponto em que ele se põe do horizonte oeste, bem como a inclinação do seu círculo diurno com o horizonte, dependem da declinação do Sol (o quanto ele está mais ao norte ou mais ao sul do equador celeste) e da latitude do lugar (que determina a inclinação do equador celeste em relação ao horizonte da localização). A estrela cujo círculo diurno fica totalmente acima do horizonte é chamada circumpolar. O fenômeno do Sol da meia-noite ocorre em lugares onde o sol fica circumpolar em uma dada época do ano (FILHO e SARAIVA, 2019).

A Figura 2 representa o movimento diurno do sol.



Fonte: Filho e Saraiva (2019)³

2.2.10 Movimento Anual do Sol

Ao longo do ano, a posição do sol muda entre as estrelas devido ao reflexo da translação da terra em torno do sol. A trajetória anual do Sol entre as estrelas se chama eclíptica. A eclíptica nada mais é do que a projeção do plano orbital da Terra no céu (FILHO e SARAIVA, 2019).

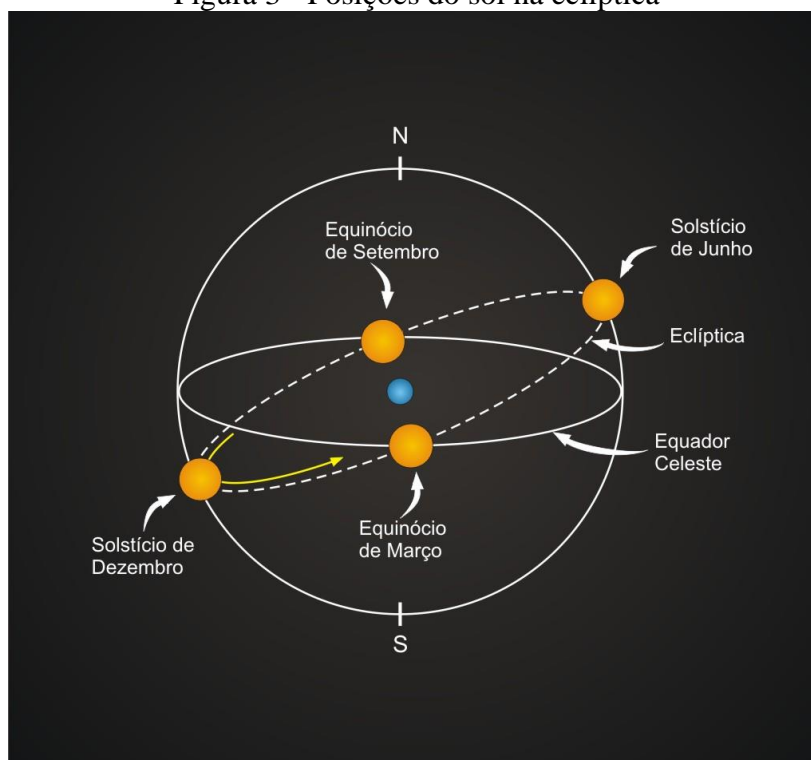
Como o ângulo de inclinação do plano orbital da Terra em relação ao equador da Terra é $23^{\circ}27'$, a trajetória aparente do Sol tem a mesma inclinação em relação ao equador celeste (obliquidade da eclíptica = $23^{\circ}27'$). Como resultado, o ponto do horizonte do lugar onde o sol

³ http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aula_movsol

nasce (no horizonte leste) e se põe (no horizonte oeste) muda ao longo do ano, assim como a sua máxima elevação acima do horizonte durante o dia (FILHO e SARAIVA, 2019).

A Figura 3 representa as posições do sol na eclíptica.

Figura 3 - Posições do sol na eclíptica



Fonte: Filho e Saraiva (2019)⁴

2.3 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico é o resultado da interação da luz com o material semicondutor da célula fotovoltaica. Nesse caso, esse efeito é responsável pela conversão da energia solar em eletricidade. Foi observado e descrito pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel. Em 1954, os pesquisadores americanos Pearson, Fuller e Chapin, do Bell Labs, criaram a primeira célula fotovoltaica de silício de cristal único. Em 1958, as células fotovoltaicas foram usadas pela primeira vez para alimentar o satélite Vanguard I (BLUESOL, 2017).

⁴ http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aula_movsol

Por meio do efeito fotovoltaico é possível transformar a radiação proveniente da energia solar em eletricidade, utilizando-se células fotovoltaicas, que são dispositivos feitos de semicondutores (em sua maioria silício).

Os semicondutores utilizados nos dispositivos de conversão fotovoltaica são compostos de elementos capazes de absorver a energia da radiação solar e transferir parte dessa energia para os elétrons, produzindo, assim, pares de portadores de carga (elétrons e lacuna).

Os elementos semicondutores mais utilizados na indústria de dispositivos de conversão fotovoltaica são: silício (Si) monocristalino, policristalino e amorfo; arseneto de gálio (GaAs); disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂); disseleneto de cobre, gálio e índio (CuInGaSe₂); e telureto de cádmio (CdTe). Um conjunto de células constituem um módulo (ZILLES *et al.*, 2012).

A Figura 4 mostra os detalhes de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino.

Figura 4 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino



Fonte: Sol Central (2015)⁵

2.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

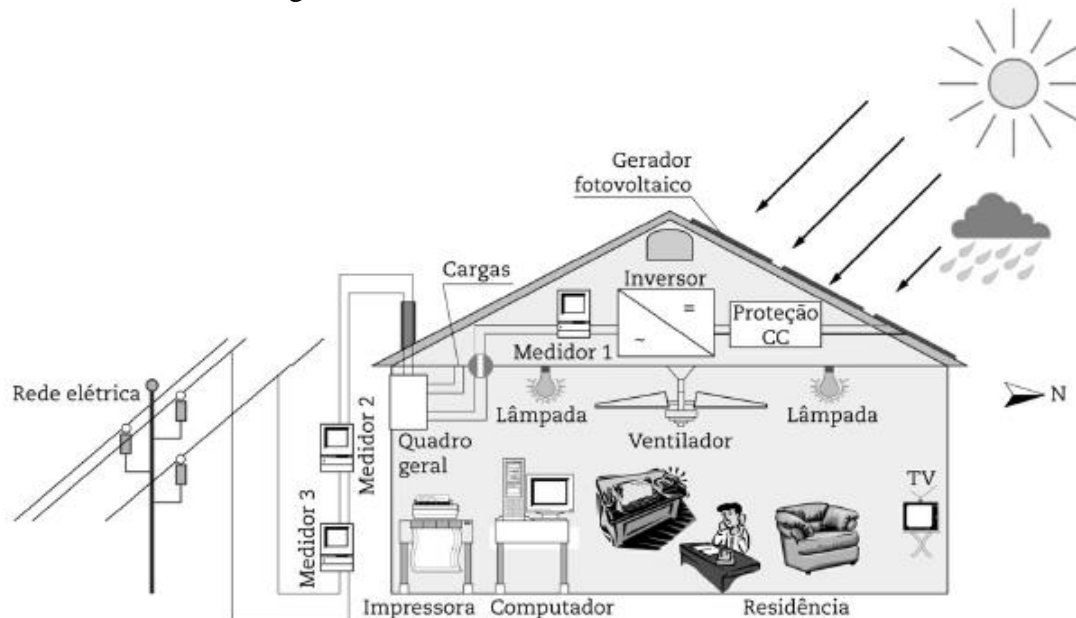
Um sistema solar conectado à rede ou um sistema fotovoltaico conectado à rede é um sistema que permanece conectado à rede de distribuição, portanto, quando não há produção de energia, pode ser aproveitado da distribuidora e, em alguns casos, a saída será excedente, e a energia será compensada em crédito (BLUESOL, 2017).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à Rede (SFCR) consistem em dispositivos que têm a função de converter a energia solar em elétrica. Por estarem conectados à rede, pode

⁵ <http://www.solcentral.com.br/produtos/>

transferir o excesso de energia gerado para a distribuidora e economizar até 95% das contas de luz (BLUESOL, 2017). A Figura 5 representa um SFCR instalado em uma residência.

Figura 5 - SFCR instalado em uma residência



Fonte: Zilles *et al* (2012)

2.4.1 Funcionamento de um SFCR

O inversor interativo recebe a energia gerada pelo módulo solar em corrente contínua (c.c) e a converte em energia elétrica em corrente alternada (c.a), cuja forma de onda é igual à da energia elétrica fornecida pela rede elétrica local. O inversor interativo injeta toda a energia gerada na estrutura geral da unidade do usuário, por exemplo, uma casa (BLUESOL, 2017).

O inversor interativo irá controlar e fornecer alternadamente energia solar e energia elétrica convencional de acordo com a demanda e as condições da radiação solar, de forma a operar e atender sempre a demanda. O SFCR funciona em paralelo com a rede pública de distribuição, ou seja, funciona da mesma forma que uma usina convencional.

A diferença entre os sistemas fotovoltaicos e os sistemas elétricos convencionais (hidrelétricos e térmicos) é a baixa potência e o local de instalação. Quando o local de instalação é na área urbana, geralmente é no telhado de uma edificação. Se a potência gerada neste momento for superior à potência dos equipamentos conectados no mesmo momento, os equipamentos conectados à rede serão supridos automaticamente por energia solar e parte da energia (energia remanescente) será destinada à rede da concessionária. Medidor de eletricidade

(relógio eletro-óptico) será instalado pela distribuidora da rede elétrica. O medidor watt-hora calculará essa energia como energia elétrica injetada e será concedido o Crédito Energético. O medidor deve ter a capacidade de medir energia elétrica bidirecional (entrada e saída), portanto, será bidirecional.

Os distribuidores instalarão este medidor gratuitamente de acordo com os regulamentos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), desde que o SFCR seja devidamente inspecionado e aprovado, procedimento este que é gratuito.

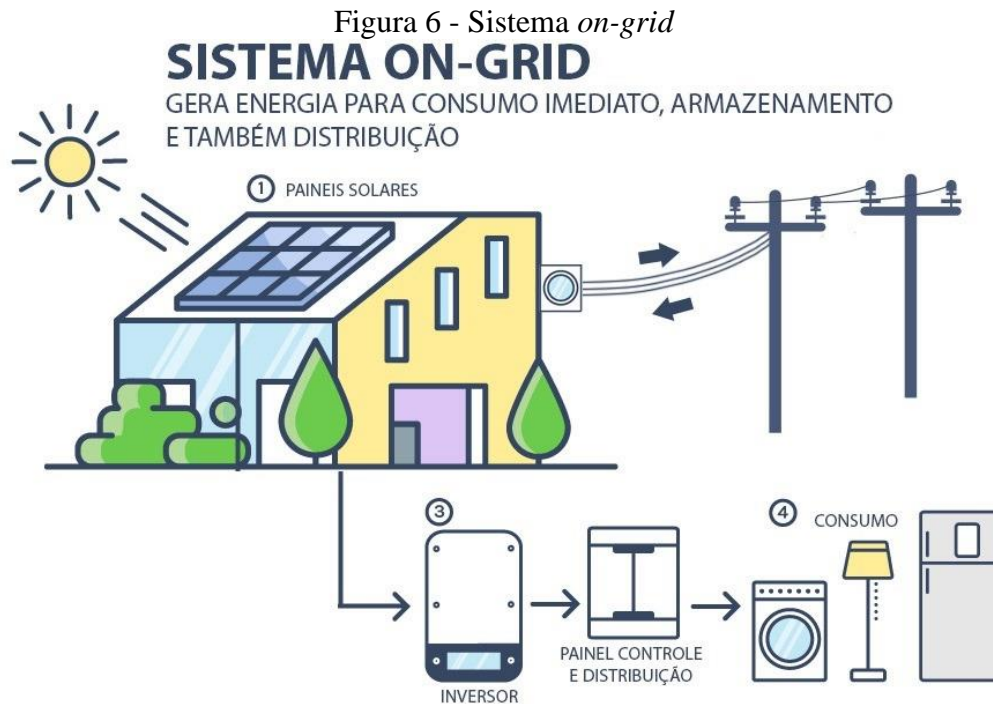
A partir de então, a conta de luz passará a apresentar dois valores: energia injetada e energia consumida. Porém, o valor monetário das contas de luz não chegará a zero, pois as distribuidoras cobram uma tarifa mínima: o chamado custo de disponibilidade.

Se os créditos de energia gerados forem maiores do que a energia consumida, esses créditos podem ser usados para outras unidades consumidoras que se cadastraram para a mesma pessoa (física ou jurídica) que possui o sistema interligado à rede (BLUESOL, 2017).

Outra alternativa é armazenar créditos de energia para uso futuro quando a geração de energia solar for baixa e os créditos gerados forem menores que a quantidade de energia consumida. Considerando que em períodos de menor insolação (por exemplo, inverno, nublado, chuvoso) a geração de energia solar tende a ser mais baixa, o que é uma opção muito interessante. Por outro lado, durante os períodos de sol intenso (por exemplo, no verão), a quantidade de geração de energia tende a ser alta, compensando assim os períodos de menor insolação (BLUESOL, 2017).

2.5 SISTEMA *ON-GRID*

Um sistema solar conectado à rede é um sistema conectado a uma rede pública de distribuição de energia. Desse modo, em momentos em que não há geração de energia solar, é possível utilizar a energia da distribuidora e, se houver excesso, o usuário recebe crédito da distribuidora. Não é necessário o investimento em baterias solares para a implantação desse sistema, o que torna sua instalação mais barata (PORTAL SOLAR, 2019). A Figura 6 representa um sistema *on-grid*.



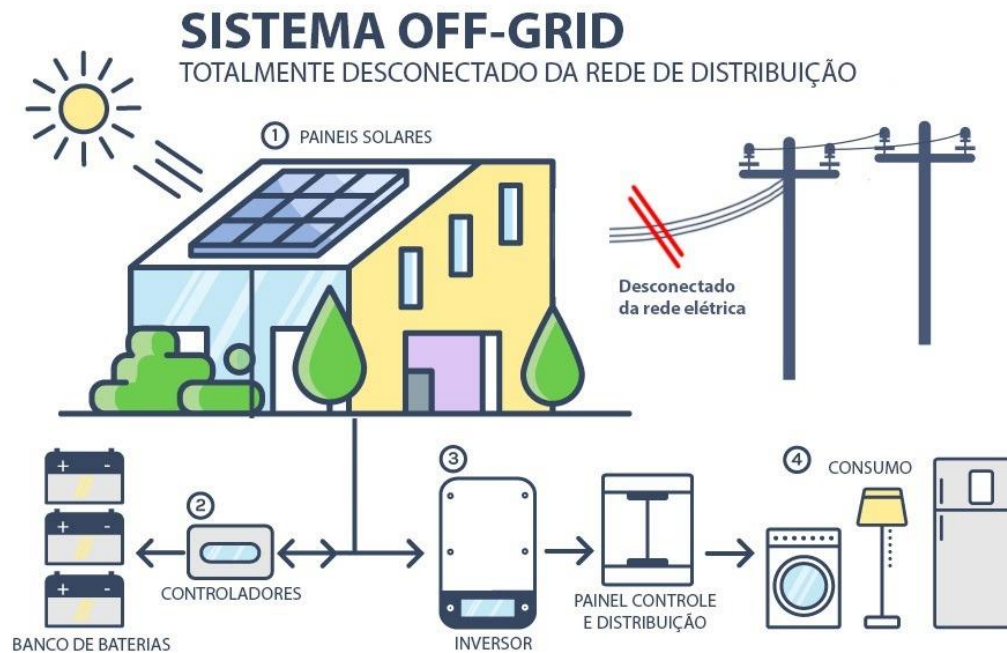
Fonte: Martins Solar (2020)⁶

2.6 SISTEMA *OFF GRID*

Uma característica dos sistemas isolados ou autônomos é o fato da geração de energia solar fotovoltaica não estar conectados à rede. O sistema alimenta diretamente equipamentos que consomem energia, e eles geralmente são construídos para fins locais específicos. Este sistema é geralmente usado em áreas remotas porque normalmente é a forma mais econômica e prática de se obter eletricidade nessas áreas. Usa-se esse sistema, por exemplo, para bombear água, energizar cercas, geladeiras para armazenar vacinas, galpões para armazenar leite, postes de luz e assim por diante (STROM BRASIL, 2018).

A energia gerada é armazenada na bateria, garantindo que ela possa fornecer eletricidade na ausência de luz solar. Como o custo é mais alto do que o sistema conectado à rede, o sistema fora da rede tem a vantagem de ser autossustentável por meio do uso de baterias (STROM BRASIL, 2018). A Figura 7 representa um sistema *off-grid*.

⁶ https://solarmartins.com.br/sistema-solar-on-grid-e-off-grid/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=sistema-solar-on-grid-e-off-grid

Figura 7 - Sistema *off-grid*

Fonte: Martins Solar (2020)⁷

2.7 SISTEMA HÍBRIDO

Os sistemas fotovoltaicos híbridos oferecem uma série de aplicações específicas, sendo que a composição do equipamento pode variar de acordo com a aplicação. É importante ressaltar que o novo sistema solar híbrido não deve ser confundido com o antigo modelo híbrido. Aqueles que usam energia solar e eólica ao mesmo tempo. A principal característica do sistema híbrido de que vamos falar é que ele pode gerar eletricidade através do sol enquanto armazena todo o excesso de energia gerado na bateria (OCA SOLAR ENERGIA, 2021).

A principal característica do sistema solar híbrido é a capacidade de armazenar a energia produzida pela bateria. Como um sistema de energia solar conectado à rede e um sistema solar conectado à rede em conjunto com um sistema de armazenamento de energia (sistema fora da rede). Portanto, o sistema solar híbrido oferece economia e maior confiabilidade, pois continua a operar durante uma queda de energia, por exemplo. Existem diferentes tipos de energia solar híbrida com diferentes funções e aplicações (OCA SOLAR ENERGIA, 2021).

Cada tipo de sistema fotovoltaico híbrido possui equipamentos diferentes quanto à sua composição e instalação. Permitir que todos os tipos de consumidores usem sistemas solares

⁷ https://solarmartins.com.br/sistema-solar-on-grid-e-off-grid/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=sistema-solar-on-grid-e-off-grid

híbridos para economizar e obter independência energética, além do consumo de energia ininterrupto. A Figura 8 representa um sistema híbrido (OCA SOLAR ENERGIA, 2021).

Figura 8 - Sistema híbrido



Fonte: Oca Solar Energia (2021)⁸

2.8 VANTAGENS DE DESVANTAGENS (SISTEMA *ON-GRID* E *OFF-GRID*)

O Quadro 1 apresenta as vantagens e desvantagens de um sistema *on-grid* e um sistema *off-grid*.

⁸ <https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/sistema-fotovoltaico-hibrido-entenda-o-que-e/>

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens (sistema *on-grid* e *off-grid*)

Sistema <i>on-grid</i>		Sistema <i>off-grid</i>	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Custo reduzido	Não é completamente independente	Pode ser utilizado em regiões remotas	Custo mais elevado
Possibilidade de utilizar os créditos em outra unidade consumidora do mesmo proprietário	Pagamento do custo de disponibilidade (o mínimo pelo uso da rede)	Possui um sistema de armazenamento de energia	Depende de bateria e sistemas de carga
Dispensa a utilização de baterias e sistema de cargas	Não tem sistema de armazenamento	Não há custo de disponibilidade	Menor eficiência energética em relação ao sistema <i>on-grid</i>

Fonte: Solarion (2019). Adaptado pelos autores (2021)

2.9 CUSTO MÉDIO DE IMPLANTAÇÃO DE UM PAINEL SOLAR E EQUIPAMENTO

A Tabela 1 apresenta os preços médios totais de instalação de módulo solar e equipamento. Foi considerada uma insolação de 4,5 HSP e uma média de perdas de 20%. Para um gerador solar de 2,03kWp, o preço médio de instalação é de R\$ 15.818,78 para uma residência que consome mensalmente uma média de 186,3 kWh (PORTAL SOLAR, 2018).

Tabela 1 – Preço médio de instalação (módulo solar e equipamento) para residências

Potência do gerador solar	Preço médio	Consumo médio mensal
2,03kWp	R\$ 15.818,78	186,3 kWh
2,43kWp	R\$ 16.760,55	298,08kWh
3,65kWp	R\$ 22.372,49	372,6kWh
4,46kWp	R\$ 26.122,80	447,12kWh
4,86kWp	R\$ 27.747,49	521,64kWh
5,27kWp	R\$ 29.580,19	558,9kWh
6,48kWp	R\$ 34.222,86	670,68kWh
6,89kWp	R\$ 35.868,27	707,94kWh

Fonte: Portal Solar (2018). Adaptado pelos autores (2021)

A Tabela 2 apresenta o preço médio de instalação e equipamento para comércios.

Tabela 2 - Preço médio de instalação e equipamento para comércios

Consumo médio	Potência do Sistema
186,3 kWh	2,03kWp
298,08kWh	2,43kWp
447,12kWh	4,46kWp
670,68kWh	6,48kWp
819,72kWh	7,70kWp
1564,92Wh	14,58kWp

Fonte: Portal Solar (2018). Adaptado pelos autores (2021)

A Tabela 3 apresenta o preço médio de instalação e equipamento para indústrias.

Tabela 3 - Preço médio de instalação e equipamento para indústrias

Consumo médio	Potência do Sistema
76,95kWp	R\$ 313.451,90
107,73kWp	R\$ 441.590,45
202,50kWp	R\$ 836.098,80
324,00kWp	R\$ 1.341.850,08

Fonte: Portal Solar (2018). Adaptado pelos autores (2021)

2.10 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Com o tempo, a tecnologia da eletrônica de potência tornou mais fácil (e barato) acionar motores com velocidades variáveis. Com isso, para sistemas que usavam motores c.c no passado, para fácil controle, os motores de indução c.a agora podem ser usados com a ajuda de conversores de frequência (também chamados de inversores de frequência). Com o desenvolvimento da tecnologia de eletrônica de potência, a tecnologia de microeletrônica ajudou muito no funcionamento dos motores c.a com a ajuda de microprocessadores e microcontroladores, de modo que funções complexas podem ser implementadas em tempos de processamento cada vez mais curtos. Desta forma, algoritmos de controle complexos podem ser implementados para obtenção de alto desempenho. Por exemplo, pode-se citar que motores de indução acionados por conversores de frequência podem substituir vantajosamente os sistemas de controle de fluxo por válvulas (bombas) ou amortecedores (ventiladores).

Atualmente, no caso de aumentar a produção e reduzir custos, a automação surgiu nesta situação, esta automação ainda está em um estágio inicial no Brasil, por isso muitos dispositivos foram desenvolvidos para a maioria das aplicações e campos industriais. Nestes processos, o equipamento mais comumente utilizado com CLP (controlador lógico programável) é o conversor de frequência, que é um equipamento multifuncional e dinâmico. Um conversor de frequência é um dispositivo que pode gerar tensão e frequência trifásicas ajustáveis e sua finalidade é controlar a velocidade de um motor de indução trifásico (SILVA, 2021).

Um conversor de frequência nada mais é do que um dispositivo eletrônico que pode alterar a velocidade de rotação de um motor trifásico. O nome de "conversor de frequência" é dado pela sua forma de ação (SILVA, 2021).

O principal objetivo do conversor de frequência é alterar a frequência da rede que fornece energia ao motor, de forma que o motor siga uma frequência diferente da frequência fornecida pela

2.10.1 Inversor de frequência *on-grid*

O inversor solar *grid tie (on grid)* é um dos mais utilizados em painéis solares mundo afora. Este inversor é utilizado para fazer a conexão entre o sistema de energia solar e a rede de distribuição da empresa ou consumidor, promovendo uma sincronização da tensão de saída (V) e da frequência (Hz). Um dos diferenciais desse tipo de inversor é o desligamento automático caso ocorra queda de energia. Dessa forma, o inversor solar *grid tie (on grid)* evita curtos circuitos que podem surgir por conta da falha no fornecimento de energia (PORTAL SOLAR, 2018).

2.10.2 Inversor de frequência *off-grid*

Os inversores solares *off-grid* (fora da rede) são desenvolvidos para sistemas fotovoltaicos que estão desconectados da rede, ou seja, sistemas que usam baterias e geralmente estão localizados em áreas que não podem ser conectadas à rede. O tamanho do inversor *off-grid* varia de acordo com a aplicação. Inversores fora *off-grid* menores têm uma faixa de potência de 150 W a 2.000 W, são leves e podem ser facilmente transportados ou movidos de um sistema para outro. Inversores *off-grid* mais potentes são usados para operar dispositivos com maior consumo de energia, como televisores, geladeiras, máquinas, ferramentas elétricas

e equipamentos de telecomunicações. Inversores *off-grid* acima de 2.000 W são mais pesados e precisam ser instalados permanentemente. Eles têm muitas funções avançadas, como controle de carga e monitoramento pela internet (PORTAL SOLAR, 2018).

2.10.3 Inversor de frequência híbrido

Os inversores solares híbridos podem operar tanto conectado quanto isolado da rede. Esse inversor tem a capacidade de trabalhar como um inversor *on-grid* e *off-grid* ao mesmo tempo. O diferencial desse inversor em relação aos demais está na sua operação simultânea, possibilitando que o modelo realize seu trabalho conectado à rede ao mesmo tempo em que o banco de baterias carrega e vice-versa, por exemplo (PORTAL SOLAR, 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Essa pesquisa foi realizada a partir de dois métodos. O primeiro consiste em uma revisão bibliográfica a partir de uma pesquisa qualitativa e informativa, a qual foi elaborada buscando identificar e compreender os passos e os materiais utilizados para a geração de energia elétrica a partir da radiação solar.

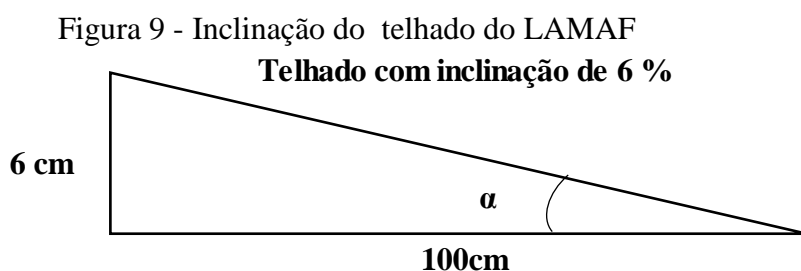
Com o outro método, com base na análise de dados disponibilizados pela Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás (EMC), obtidos de sua estação meteorológica e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi possível fazer uma comparação de dados e utilizá-los.

O aplicativo RadiaSol2, disponibilizado pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), foi usado para o cálculo da radiação solar incidente do plano estudado. Esse procedimento foi essencial para dar continuidade ao estudo do desempenho do inversor.

3.1 EDIFICAÇÃO

A cobertura do Laboratório de Materiais e Processo de Fabricação (LAMAF) da EMC/UFG em Goiânia foi escolhida para a realização do estudo de caso, cujas coordenadas geográficas são: 16°40'42'' sul e 49°14'29'' oeste.

O laboratório é revestido pela telha isotérmica trapezoidal. De acordo com (Kinspan, 2019), a inclinação mínima da telha é de 6%. Isso significa que a cada metro percorrido na horizontal o telhado eleva 6 cm, conforme mostra a Figura 9. Desse modo, foi adotado a inclinação de 6% para a cobertura do LAMAF.



Fonte: Autores (2021)

onde:

α = ângulo de inclinação do plano.

Portanto, a inclinação do plano da cobertura do laboratório é:

$$\alpha = \arctan (0,06/100) = 3,43^\circ.$$

3.2 MATERIAIS ESCOLHIDOS

Para a realização do estudo, escolheu-se o módulo fotovoltaico da CanadianSolar Hiku CS3L – 330P 330 W (Figura 10). Foram considerados 11 módulos fotovoltaicos para determinar a máxima potência fornecida pelo gerador fotovoltaico. As demais especificações técnicas encontram-se no ANEXO A - Datasheet: Módulos solares.

Figura 10 - Módulo solar CanadianSolar Hiku CS3L



Fonte: CanadianSolar (2019)⁹. Adaptado pelos autores (2021)

Foi considerado, também, o inversor Fronius Primo 3.0-1 3 kWp (Figura 11), modelo este que apresenta boa produtividade e performance, resistência a altas temperaturas e apresenta um design mais flexível, o que facilita, inclusive, sua montagem (ALDO, 2020).

⁹ https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-HiKu_CS3L-P_EN.pdf

Figura 11 - Inversor Fronius Primo 3.0-1 3 kWp



Fonte: Fronius (2021)¹⁰. Adaptado pelos autores (2021)

As especificações técnicas do inversor escolhido encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações técnicas inversor Fronius Primo 3.0-1 3kWp

Dados de Entrada	
Corrente máx. de entrada (I_{cc} máx)	12 / 12 A
Faixa de tensão de entrada CC (U_{cc} mín – U_{cc} máx)	80 – 1000 V
Alimentação de tensão inicial (U_{cc} inicial)	80 V
Tensão nominal de entrada ($U_{cc,r}$)	710 V
Faixa de tensão MPP (U_{mpp} mín – U_{mpp} máx)	200 – 800 V
Faixa de tensão MPP utilizável	80 – 800 V
Dados de Saída	
Potência nominal CA ($P_{ca,r}$)	3000 W
Potência máx. de saída (P_{ca} máx)	3000 VA
Potência máxima de saída (I_{ca} nom)	13 A
Faixa de tensão CA ($U_{mín}$ – $U_{máx}$)	180 – 270 V

Fonte: Fronius (2021). Adapato pelos autores (2021)

¹⁰ <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/instaladores-e-parceiros/visao-geral-dos-dados-tecnicos>

3.3 COTAÇÃO DE PREÇOS

O preço médio do módulo solar é de R\$ 949,00 (US\$ 186,81. Cotação de junho de 2021) e do inversor R\$ 6407,70 (US\$ 1.261,36). Como o projeto contém 11 módulos solares, o preço da cotação dos equipamentos é de R\$ 16.846,70 (US\$ 3.316,28). Além disso, há mais algumas despesas de materiais extras, frete e instalação que será estimado em 20% do valor dos equipamentos citados (módulo solar e inversor). Portanto, o preço inicial do projeto é estimado em R\$ 20.216,04 (US\$ 3.979,54).

3.4 COMPARAÇÃO DE DADOS ENTRE ESTAÇÕES DA EMC E INMET

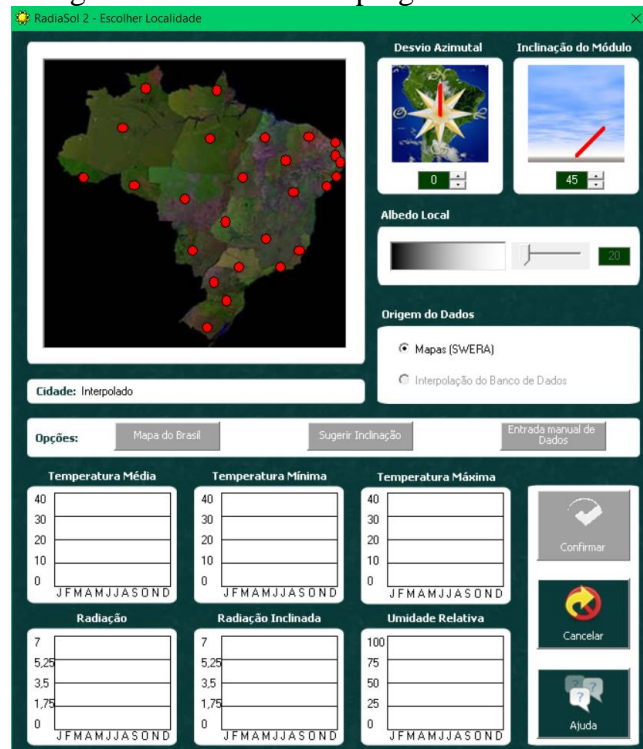
Foram analisadas as radiações captadas pela estação da EMC e pelo INMET para todos os meses do ano de 2020. Por meio dos dados captados e usando a estação da EMC como referência, foi possível determinar a temperatura de célula do gerador fotovoltaico para os meses do ano considerado.

3.5 PROGRAMA COMPUTACIONAL

Após a análise de dados da radiação no plano horizontal captados pela estação da EMC e do INMET, foi feita a análise da radiação solar incidente do plano inclinado em estudo pelo programa Radiasol 2, disponibilizado pelo LABSOL da Escola de Engenharia da UFRGS.

O programa Radiasol 2 permite que seja definido o ângulo de orientação azimutal no plano dos módulos e ângulo de inclinação. A Figura 12 mostra a interface do programa.

Figura 12 - Interface do programa Radiasol 2



Fonte: Radiasol 2 (2021). Adaptado pelos autores (2021)

Após a inserção dos dados iniciais, o programa gera dados horários da irradiação global, além de dividi-los em valores de radiação direta e difusa para cada hora no período de um ano e calcula também a irradiação horária sobre o plano inclinado. É possível observar os dados em forma de gráfico ou exportá-los (PINHO E GALDINO, 2014).

3.6 EQUACIONAMENTO

3.6.1 Temperatura de operação da célula

De acordo com Zilles *et al.* (2012), pode-se obter a temperatura de operação da célula por meio da equação (1).

$$T_c = T_a(^{\circ}C) + H_{t,\beta} (W \cdot m^{-2}) \left(\frac{TNOC (^{\circ}C) - 20(^{\circ}C)}{800 W \cdot m^{-2}} \right) \cdot 0,9 \quad (1)$$

onde:

T_c = temperatura de operação da célula;

T_a = temperatura ambiente;

T_{NOC} = temperatura nominal de operação da célula, considerada 47 °C neste trabalho;

$H_{t,\beta}$ = irradiância incidente no plano gerador e β é a inclinação do plano.

O desempenho das células solares depende não apenas da luminosidade, mas também da temperatura. A temperatura é um parâmetro importante porque, como as células são expostas à luz do sol, elas recebem muito calor. Além disso, parte da incidência solar absorvida não é convertida em energia elétrica, mas é dissipada na forma de calor. É por isso que a temperatura da célula é superior à temperatura ambiente.

A temperatura ambiente é definida como a temperatura do ar em um determinado ambiente, sem a influência da troca de calor com fontes calóricas. De acordo com as condições de referência, que neste caso são as condições padrão, a temperatura é de 25 °C.

3.6.2 Máxima potência do gerador fotovoltaico

A máxima potência fornecida pelo gerador fotovoltaico em uma dada condição de operação é dada pela equação (2) (ZILLES *et al.*, 2012).

$$P_{mp} = P_{FV}^0 \frac{H_{t,\beta}}{H_{ref}} [1 - \gamma_{mp}(T_c - T_{c,ref})] \quad (2)$$

onde:

P_{FV}^0 = é a potência nominal do gerador fotovoltaico. Esse valor é dado pela multiplicação do número total de módulos que constituem o gerador fotovoltaico pela potência nominal do modelo utilizado;

$H_{t,\beta}$ = irradiância incidente no plano gerador e β é a inclinação do plano;

H_{ref} = irradiância de referência;

γ_{mp} = coeficiente de temperatura do ponto de máxima potência;

T_c = temperatura de operação da célula;

$T_{c,ref}$ = temperatura nas condições de referência.

Entretanto, o valor obtido na equação (2) representa um valor teórico, desprezando perdas no processo de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP). Desse modo, o valor realístico de potência entregue ao inversor pode ser obtido pela equação (3) (ZILLES *et al.*, 2012).

$$P_{mp} = P_{FV}^0 \frac{H_{t,\beta}}{H_{ref}} [1 - \gamma_{mp}(T_c - T_{c,ref})] \eta_{SPMP} \quad (3)$$

onde:

η_{SPMP} = eficiência de seguimento do ponto de máxima potência.

3.6.3 Potência de saída do SFCR

Considerando as perdas de seguimento do PMP, Zilles *et al.* (2012) assumem que η_{SPMP} é igual a 85% para $P_{mp} < 0,2(P_{INV}^0 / \eta_{100})$ e 98% para $P_{FV} \geq 0,2(P_{INV}^0 / \eta_{100})$, onde P_{INV}^0 corresponde à potência nominal do inversor refletida para o lado c.c.

Zilles *et al.* (2012) afirmam que conversão c.c./c.a. do inversor é uma função dependente do autoconsumo e do carregamento. Essa dependência é computada por meio dos parâmetros característicos. Essa dependência é computada por meio dos parâmetros k_0, k_1, k_2 , cujos valores são determinados pelas equações (4), (5) e (6).

$$k_0 = \frac{1}{9} \frac{1}{\eta_{inv100}} - \frac{1}{4} \frac{1}{\eta_{inv50}} + \frac{5}{36} \frac{1}{\eta_{inv10}} \quad (4)$$

$$k_1 = -\frac{4}{3} \frac{1}{\eta_{inv100}} - \frac{33}{12} \frac{1}{\eta_{inv50}} - \frac{5}{12} \frac{1}{\eta_{inv10}} - 1 \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{20}{9} \frac{1}{\eta_{inv100}} - \frac{5}{2} \frac{1}{\eta_{inv50}} + \frac{5}{18} \frac{1}{\eta_{inv10}} \quad (6)$$

Após os cálculos desses parâmetros, é possível calcular a potência de saída do inversor, representada aqui pela equação (7):

$$k_0 - p_{FV} + (1 + k_1)p_{saída} + k_2 p_{saída}^2 = 0 \quad (7)$$

onde:

p_{FV} e $p_{saída}$ são, respectivamente, os valores de saída de potência do gerador fotovoltaico e do inversor, todos normalizados com relação à potência nominal do inversor (P_{INV}^0).

De acordo com Zilles *et al.* (2012), após calculada a potência ativa fornecida pelo SFCR (P_{FV}) a partir da radiação solar incidente no seu plano ($H_{t,\beta}$) e da temperatura ambiente (Ta), e, posteriormente, a potência de saída do inversor ($P_{saída}$), utilizam-se as equações. (8), (9) e (10) para considerar as perdas por limitação e autoconsumo do inversor.

$$P_{saída} = P_{INV}^{máx} \quad \dots \quad \text{se } P_{saída} \geq P_{INV}^{máx} \quad (8)$$

$$P_{saída} = 0 \quad \dots \quad \text{se } P_{saída} \leq k_0 P_{INV}^0 \quad (9)$$

$$P_{saída} = p_{saída} P_{INV}^0 \quad \dots \quad \text{se } k_0 P_{INV}^0 \leq P_{saída} \leq P_{INV}^{máx} \quad (10)$$

onde:

$P_{INV}^{máx}$ = potência máxima de saída do inversor.

3.6.4 Fator de dimensionamento do inversor

O fator de dimensionamento do inversor (FDI) é dado pela razão entre a potência nominal do inversor e a potência nominal ou potência de pico do gerador fotovoltaico. Um FDI é 0,75 significa que a capacidade do inversor é 75% da potência do gerador fotovoltaico (ZILLES *et al.*, 2012). O FDI é determinado pela equação (11):

$$FDI = \frac{P_{INV}^0}{P_{FV}^0} \quad (11)$$

Fabricantes recomendam um FDI entre 0,75 a 0,85. Desse modo, pode-se dizer o que o inversor está bem dimensionado se o FDI estiver dentro da faixa mencionada. Pela equação (11) e levando em consideração a potência dos módulos solares e do inversor escolhido, o FDI é:

$$FDI = \frac{P_{INV}^0}{P_{FV}^0} = \frac{3000 \text{ (W)}}{11 \cdot 330 \text{ (Wp)}} = \frac{3000 \text{ (W)}}{3630 \text{ (Wp)}} = 0,83$$

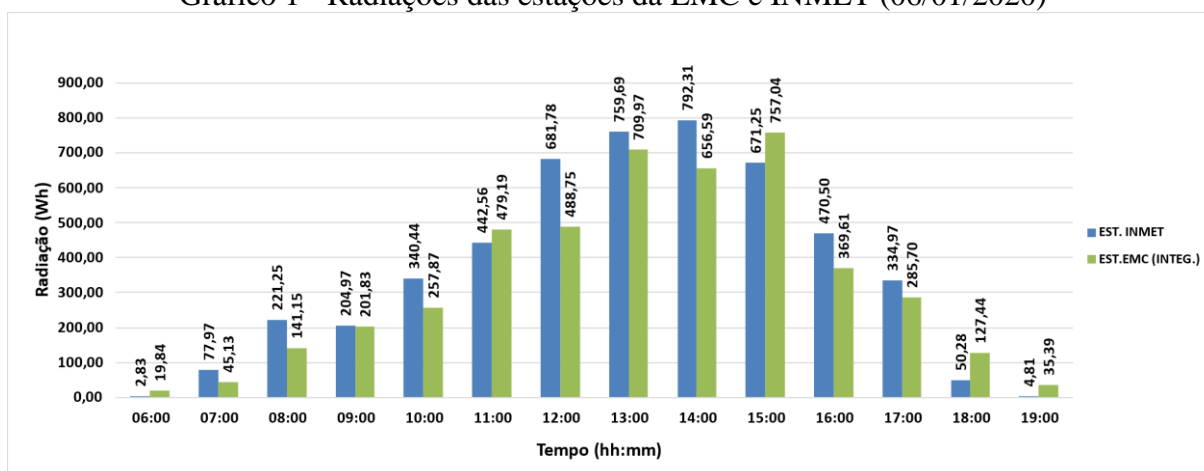
Portanto, o valor do FDI está dentro do limite recomendado e o inversor está bem dimensionado.

4 RESULTADOS

4.1 COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DAS ESTAÇÕES EMC E INMET

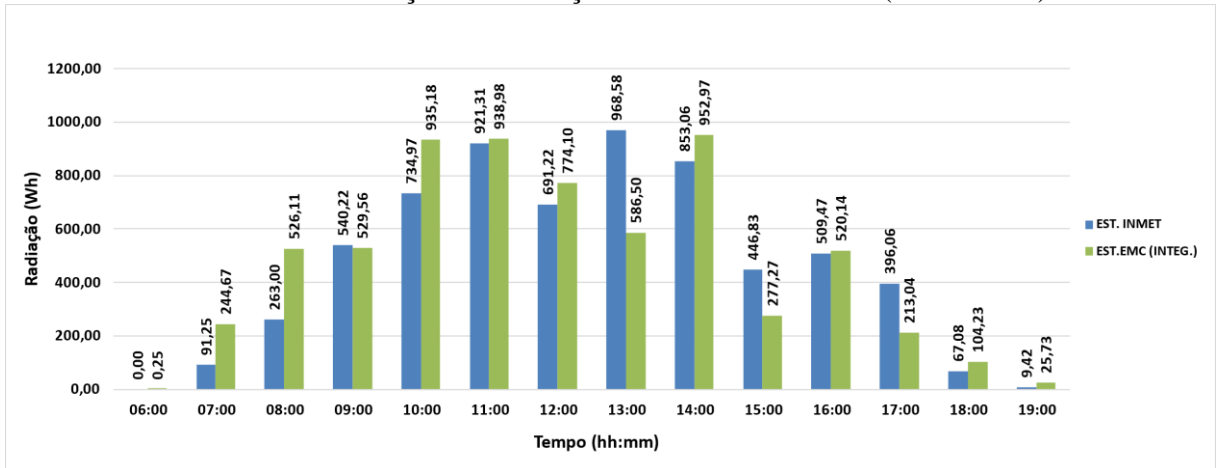
Para a realização do procedimento de comparação de dados da radiação solar entre a estação da EMC e a estação do INMET, realizou-se um minucioso tratamento de dados. A estação da EMC disponibiliza os dados da irradiância solar a cada minuto enquanto a estação do INMET disponibiliza a cada hora. No entanto, a unidade de medida da irradiância adotada por cada estação é diferente. Desse modo, foi necessário converter a unidade de medida da irradiância da estação do INMET para se igualar a estação da EMC, assim como foi necessário realizar integralização dos valores da irradiância da estação da EMC para que os dados pudessem ser comparados. Após realizar esses ajustes de dados, foi possível obter os resultados que estão representados a partir do Gráfico 1 até o Gráfico 12.

Gráfico 1 - Radiações das estações da EMC e INMET (06/01/2020)



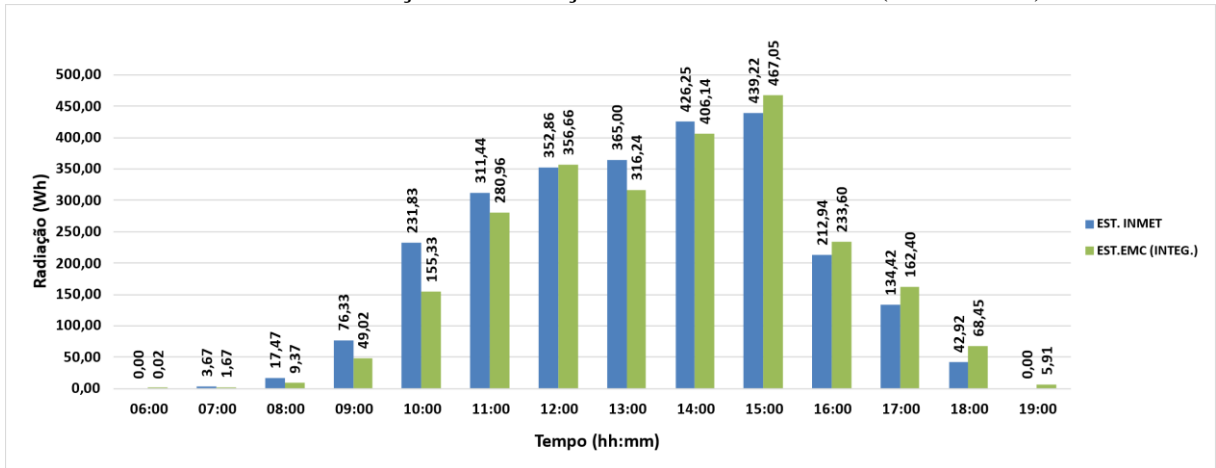
Fonte: Autores (2021)

Gráfico 2 - Radiações das estações da EMC e INMET (03/02/2020)



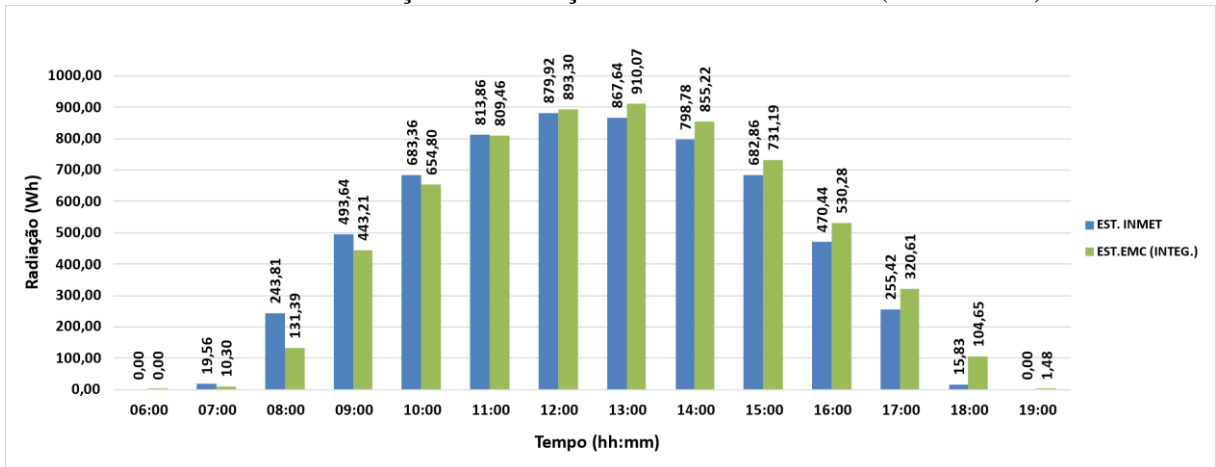
Fonte: Autores (2021)

Gráfico 3 - Radiações das estações da EMC e INMET (20/03/2020)



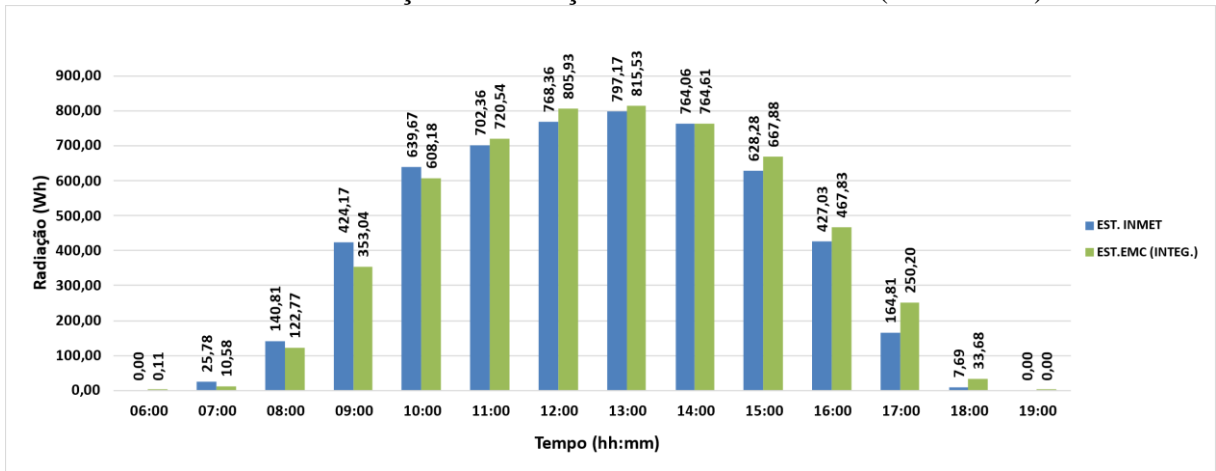
Fonte: Autores (2021)

Gráfico 4 - Radiações das estações da EMC e INMET (10/04/2020)



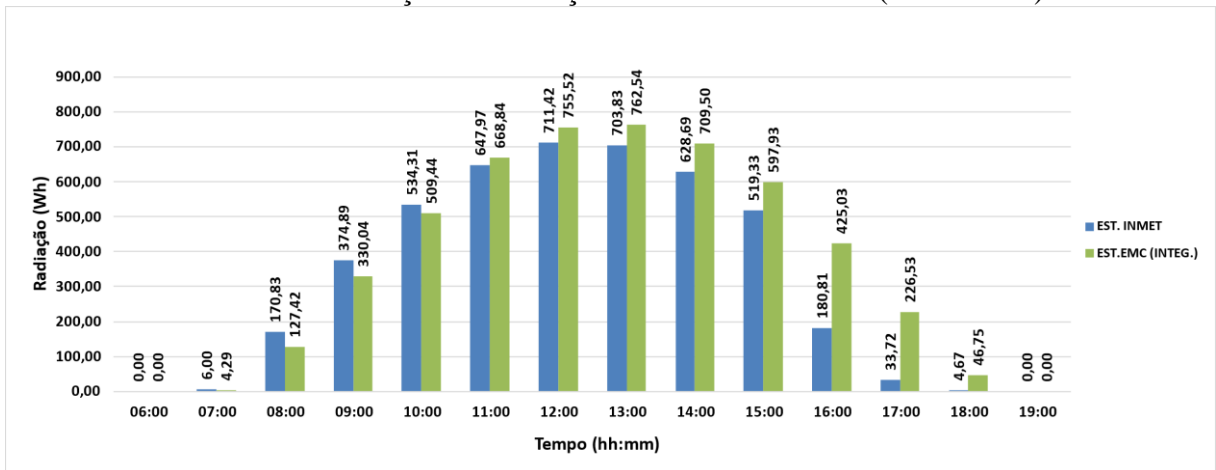
Fonte: Autores (2021)

Gráfico 5 - Radiações das estações da EMC e INMET (01/05/2020)



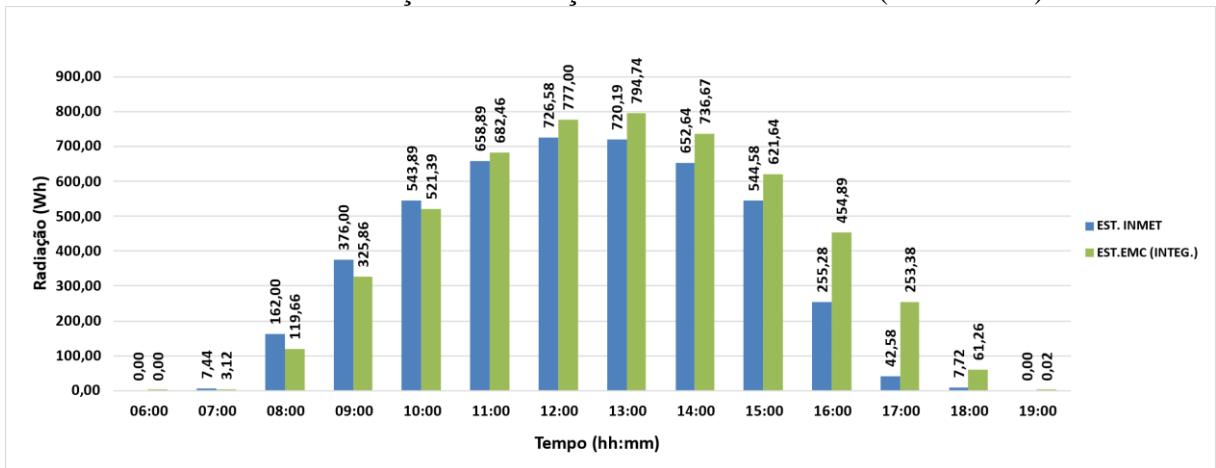
Fonte: Autores (2021).

Gráfico 6 - Radiações das estações da EMC e INMET (23/06/2020)



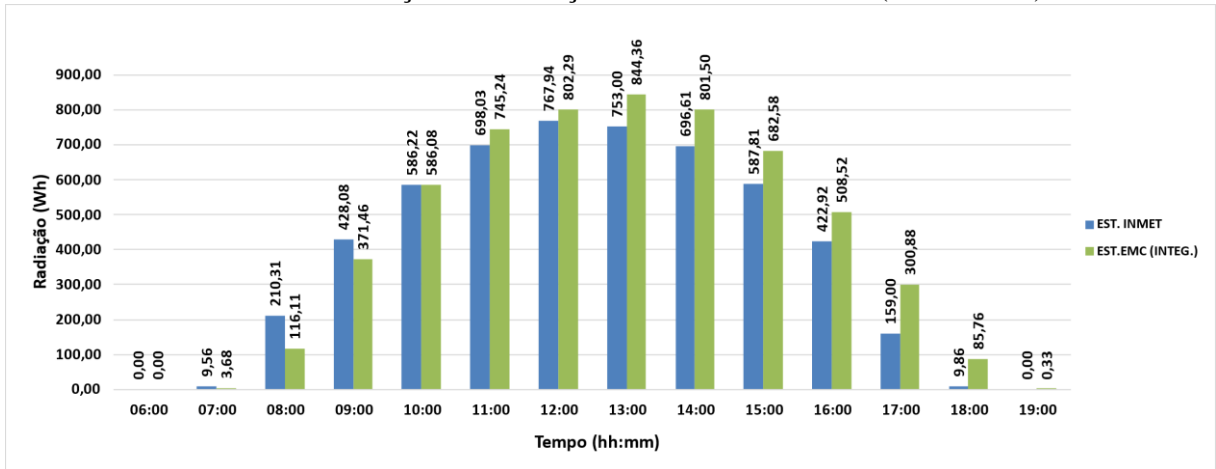
Fonte: Autores (2021).

Gráfico 7 - Radiações das estações da EMC e INMET (16/07/2020)



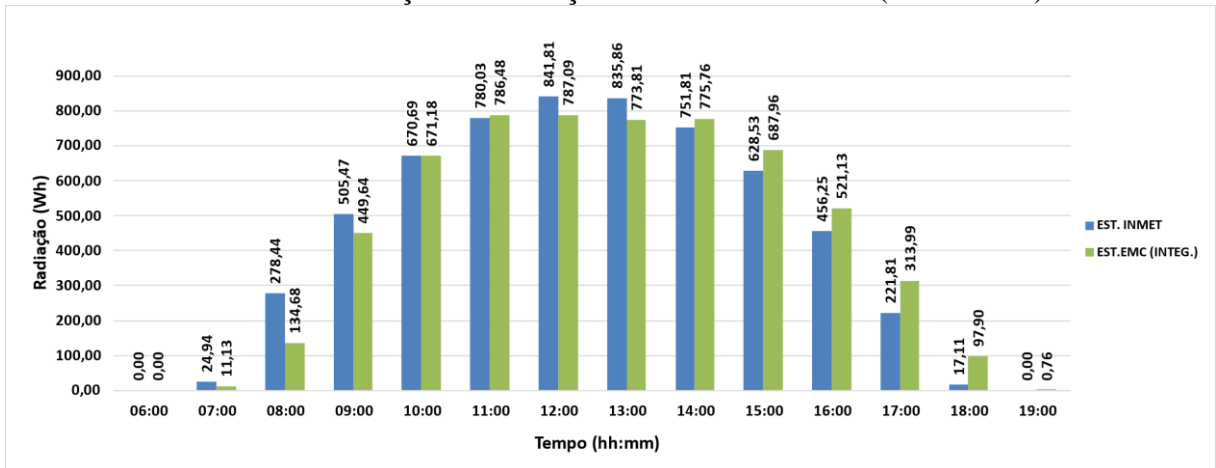
Fonte: Autores (2021).

Gráfico 8 - Radiações das estações da EMC e INMET (06/08/2020)



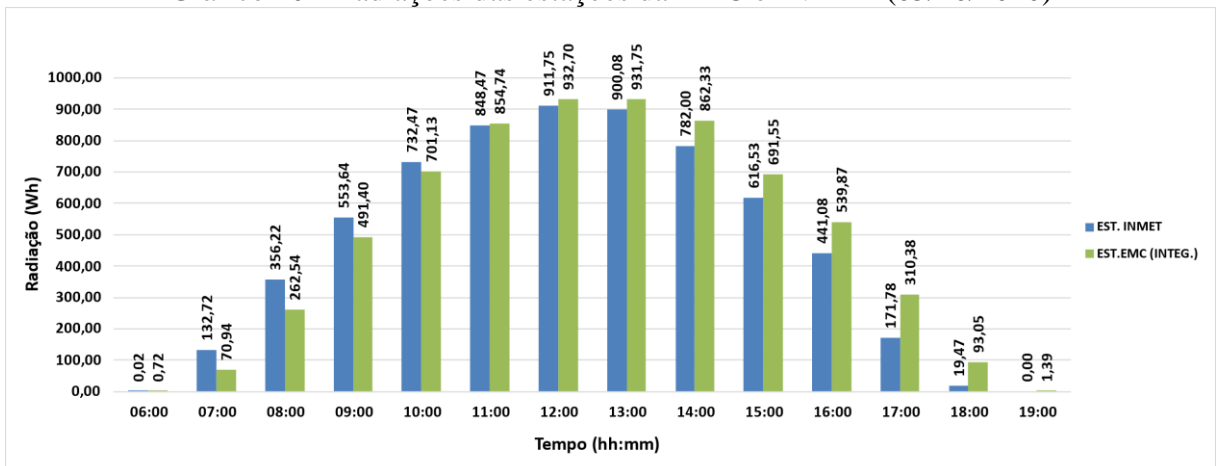
Fonte: Autores (2021)

Gráfico 9 - Radiações das estações da EMC e INMET (04/09/2020)



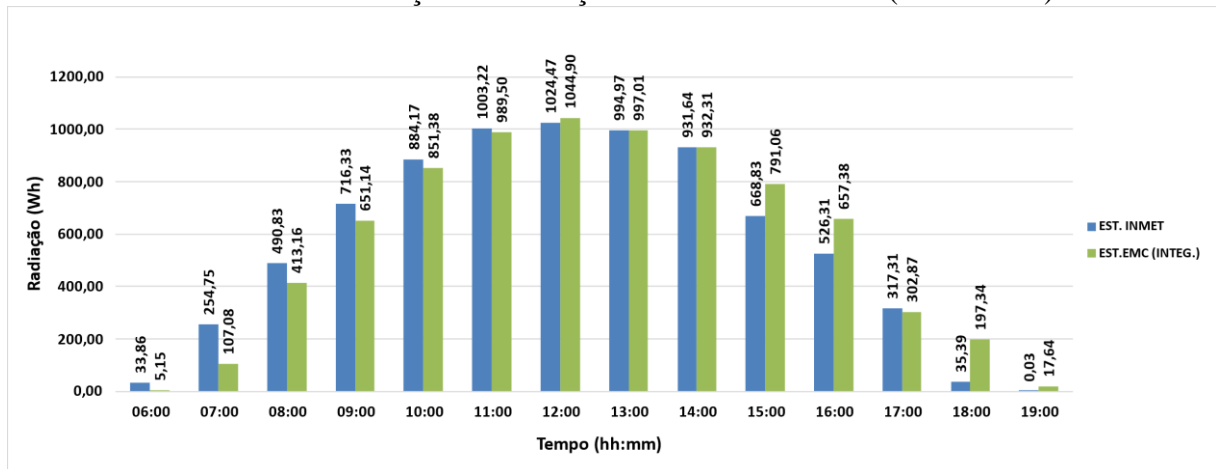
Fonte: Autores (2021)

Gráfico 10 - Radiações das estações da EMC e INMET (05/10/2020)



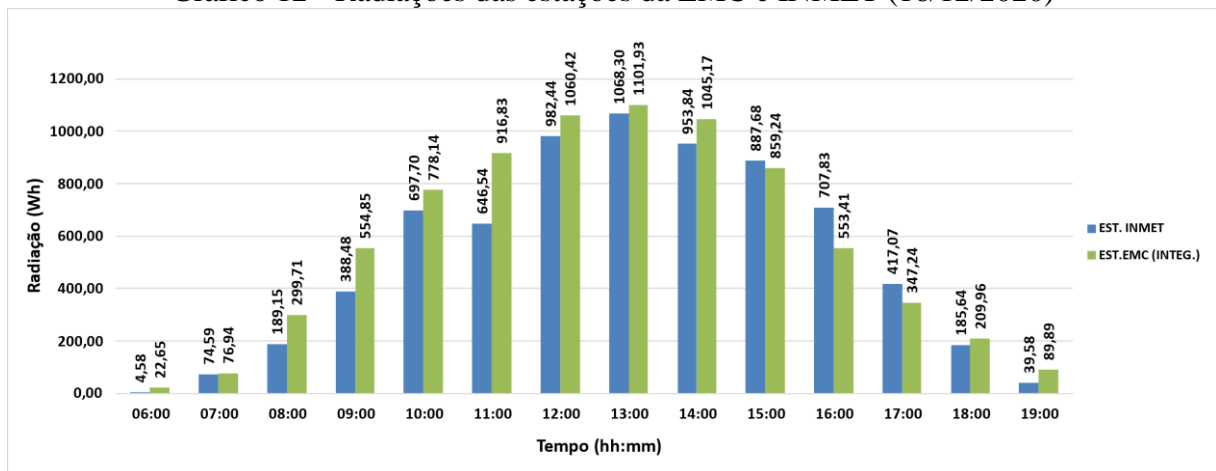
Fonte: Autores (2021)

Gráfico 11 - Radiações das estações da EMC e INMET (27/11/2020)



Fonte: Autores (2021)

Gráfico 12 - Radiações das estações da EMC e INMET (16/12/2020)



Fonte: Autores (2021)

O mês de fevereiro (Gráfico 2), apresentou um comportamento diferente dos demais. Fatores externos, como as condições climáticas, influenciam na captação da radiação solar.

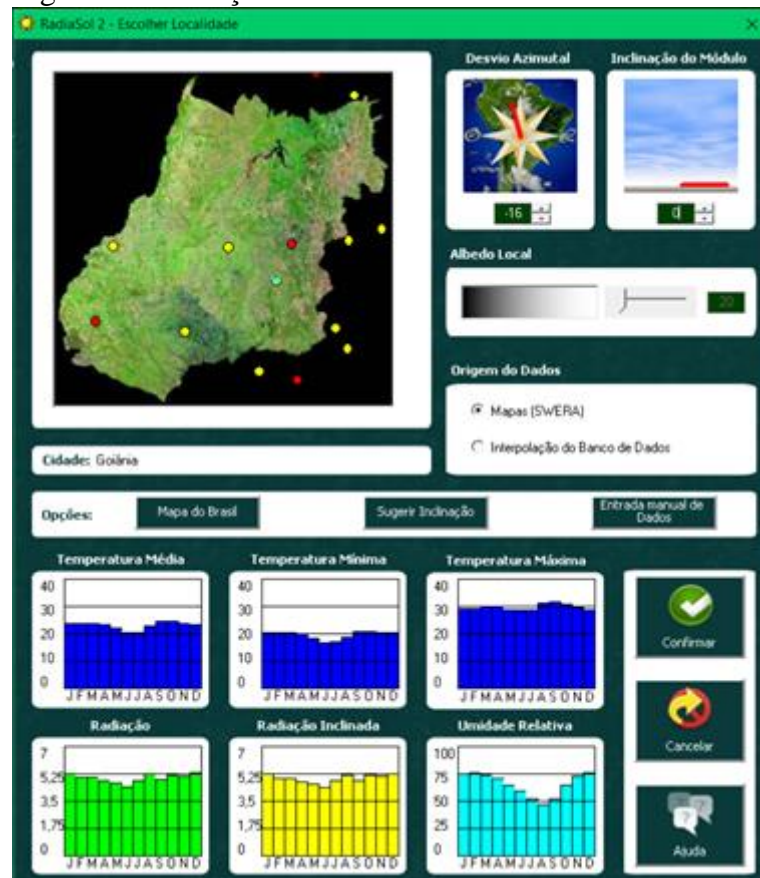
Para os outros dias do ano avaliado, as radiações captadas pelas estações demonstram que, ao longo de todo o ano, a radiação solar na região de Goiânia é propícia para a implementação de SFCR. Além disso, utilizou-se fornecidos pela estação da EMC para calcular a temperatura de operação da célula, uma vez que a essa estação está mais próxima do LAMAF, oferecendo assim dados mais consistentes em relação a estação do INMET.

4.2 PROGRAMA COMPUTACIONAL

Após fazer uma análise da radiação solar no plano horizontal, utilizou-se o Radasol 2 para verificar a radiação solar no plano inclinado conforme telhado do LAMAF.

Por meio dos dados gerados pelo Radasol 2 foi possível comparar as inclinações que oferecem maior eficiência para Goiânia. Para tal procedimento, foi considerada a estação de Goiânia, azimute -16, uma vez que as coordenadas geográficas do LAMAF é 16°40'42" sul e 49°14'29" oeste e o programa não permite valor com casas decimais. Para a inclinação, foi testado valor a partir de 0° até 45°. A Figura 13 mostra como foi inserido os dados de entrada no programa.

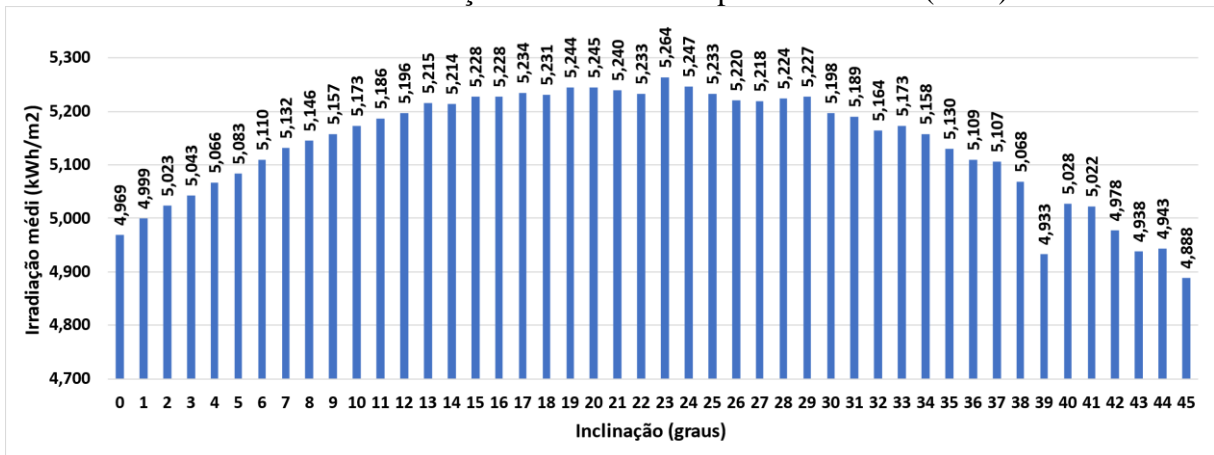
Figura 13 - Inserção de dados iniciais no Radasol 2



Fonte: Radasol 2 (2021). Adaptado pelos autores (2021)

Após o processamento de dados realizado pelo programa computacional, obteve-se os dados da irradiação média anual para o ano de 2020, conforme mostra o Gráfico 13.

Gráfico 13 - Irradiação média anual no plano inclinado (2020)



Fonte: Autores (2021)

Analisando o Gráfico 13, nota-se que o ângulo de inclinação do plano que apresentou a melhor irradiação média anual foi de 23°. No entanto, a inclinação da cobertura do LAMAF foi estimada em 3,43°. Foi considerado, neste caso, o ângulo de 4°.

4.3 POTÊNCIA DO GERADOR FOTOVOLTAICO

Após a coleta de dados da irradiação no plano inclinado, foram realizados os cálculos da temperatura de célula, em que foi considerado os valores das temperaturas captadas pela estação da EMC e máxima potência do gerador fotovoltaico em que os valores da irradiância no plano inclinado foram determinadas com utilização do Radiasol 2. Com esses dados, obteve-se a potência ativa fornecida pelo SFCR (P_{FV}).

Os resultados do processamento de dados são representados a partir da Tabela 5 até a Tabela 8, onde cada tabela representa, respectivamente, os meses de fevereiro, maio, junho e outubro do ano de 2020.

Tabela 5 - Potência média horária do gerador fotovoltaico para o mês de fevereiro de 2020

Tempo (h)	$H_{t,\beta}$ (W. m⁻²)	Ta (°C)	Tc (°C)	P_{mp} (W)	P_{FV} (W)
06:00	73	20,92	22,73	264,99	225,24
07:00	227	22,08	27,70	816,01	799,69
08:00	364	24,09	33,10	1282,80	1257,14
09:00	519	25,88	38,73	1790,88	1755,06
10:00	627	27,30	42,82	2130,01	2087,41
11:00	711	28,28	45,88	2386,95	2339,21
12:00	658	28,53	44,82	2218,15	2173,79
13:00	586	28,75	43,25	1987,40	1947,65
14:00	545	28,28	41,77	1858,92	1821,74
15:00	401	27,76	37,68	1389,16	1361,38
16:00	237	27,10	32,97	835,64	818,93
17:00	79	26,25	28,21	283,46	240,94
18:00	0	24,94	24,94	0,00	0,00
19:00	0	23,74	23,74	0,00	0,00

Fonte: Autores (2021)

onde:

$H_{t,\beta}$ = irradiância incidente no plano gerador e β é a inclinação do plano;

Tc = temperatura de operação da célula;

Ta = temperatura ambiente;

P_{mp} = potência máxima fornecida pelo gerador fotovoltaico;

P_{FV} = potência ativa entregue ao inversor.

Tabela 6 - Potência média horária do gerador fotovoltaico para o mês de maio de 2020

Tempo (h)	$H_{t,\beta}$ (W. m⁻²)	Ta (°C)	Tc (°C)	P_{mp} (W)	P_{FV} (W)
06:00	0	16,66	16,66	0,00	0,00
07:00	170	19,00	23,21	617,10	604,76
08:00	341	21,42	29,86	1216,17	1191,85
09:00	523	22,82	35,76	1824,92	1788,42
10:00	630	24,63	40,22	2161,58	2118,34
11:00	716	26,12	43,84	2422,79	2374,33
12:00	731	27,06	45,15	2461,02	2411,80
13:00	673	27,36	44,02	2275,74	2230,23
14:00	509	27,43	40,03	1747,71	1712,76
15:00	352	27,26	35,97	1227,29	1202,74
16:00	161	26,85	30,83	572,15	486,33
17:00	0	25,23	25,23	0,00	0,00
18:00	0	23,53	23,53	0,00	0,00
19:00	0	22,63	22,63	0,00	0,00

Fonte: Autores (2021)

onde:

$H_{t,\beta}$ = irradiância incidente no plano gerador e β é a inclinação do plano;

Tc = temperatura de operação da célula;

Ta = temperatura ambiente;

P_{mp} = potência máxima fornecida pelo gerador fotovoltaico;

P_{FV} = potência ativa.

Tabela 7 - Potência média horária do gerador fotovoltaico para o mês de junho de 2020

Tempo (h)	$H_{t,\beta}$ (W. m⁻²)	Ta (°C)	Tc (°C)	P_{mp} (W)	P_{FV} (W)
06:00	0,0	16,93	16,93	0,00	0,00
07:00	148	19,26	22,92	537,24	456,65
08:00	315	22,06	29,86	1123,46	1100,99
09:00	486	23,78	35,81	1695,53	1661,62
10:00	639	25,59	41,41	2182,58	2138,93
11:00	693	27,03	44,18	2341,88	2295,04
12:00	684	28,05	44,98	2304,34	2258,25
13:00	651	28,47	44,58	2196,54	2152,61
14:00	499	28,72	41,07	1706,58	1672,45
15:00	346	28,58	37,14	1201,07	1177,05
16:00	162	28,18	32,19	572,84	486,91
17:00	0	26,69	26,69	0,00	0,00
18:00	0	24,70	24,70	0,00	0,00
19:00	0	23,72	23,72	0,00	0,00

Fonte: Autores (2021)

onde:

$H_{t,\beta}$ = irradiância incidente no plano gerador e β é a inclinação do plano;

Tc = temperatura de operação da célula;

Ta = temperatura ambiente;

P_{mp} = potência máxima fornecida pelo gerador fotovoltaico;

P_{FV} = potência ativa entregue ao inversor.

Tabela 8 - Potência média horária do gerador fotovoltaico para o mês de outubro de 2020

Tempo (h)	$H_{t,\beta}$ (W. m⁻²)	Ta (°C)	Tc (°C)	P_{mp} (W)	P_{FV} (W)
06:00	0	22,07	22,07	0,00	0,00
07:00	77	24,24	26,15	278,36	236,60
08:00	225	26,19	31,76	796,88	780,94
09:00	410	28,18	38,33	1416,89	1388,55
10:00	554	29,99	43,70	1875,63	1838,11
11:00	604	31,29	46,24	2024,88	1984,38
12:00	733	32,06	50,20	2419,39	2371,00
13:00	737	32,51	50,75	2427,30	2378,76
14:00	681	32,46	49,31	2255,65	2210,53
15:00	516	32,01	44,78	1739,69	1704,90
16:00	389	31,07	40,70	1332,27	1305,63
17:00	235	29,30	35,12	821,98	805,54
18:00	86	27,78	29,91	306,66	260,66
19:00	0	26,85	26,85	0,00	0,00

Fonte: Autores (2021)

onde:

$H_{t,\beta}$ = irradiância incidente no plano gerador e β é a inclinação do plano;

Tc = temperatura de operação da célula;

Ta = temperatura ambiente;

P_{mp} = potência máxima fornecida pelo gerador fotovoltaico;

P_{FV} = potência ativa entregue ao inversor.

4.4 POTÊNCIA DE SAÍDA DO INVERSOR

Após o processamento de dados e a obtenção da potência disponibilizada ao inversor, foram realizados os cálculos da potência de saída do inversor, cujos dados são representados a partir da Tabela 9 até a Tabela 12, em que cada tabela representa, respectivamente, os meses de fevereiro, maio, junho e outubro do ano de 2020.

Tabela 9 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de fevereiro de 2020

Tempo (h)	P_{FV} (W)	$P_{saída}$ (W)	P_{Perdas} (W)	P_{Perdas} (%)
06:00	225,24	183,40	41,84	18,58
07:00	799,69	760,58	39,10	4,89
08:00	1257,14	1212,49	44,65	3,55
09:00	1755,06	1720,73	34,34	1,96
10:00	2087,41	2047,41	40,00	1,92
11:00	2339,21	2283,95	55,27	2,36
12:00	2173,79	2136,22	37,57	1,73
13:00	1947,65	1899,13	48,52	2,49
14:00	1821,74	1780,25	41,49	2,28
15:00	1361,38	1332,45	28,93	2,13
16:00	818,93	790,81	28,11	3,43
17:00	240,94	183,40	57,54	23,88
18:00	0,00	0,00	0,00	0,00
19:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autores (2021)

onde:

 P_{FV} = potência fornecida pelo gerador fotovoltaico; $P_{saída}$ = potência de saída do inversor; P_{Perdas} (W) = $P_{FV} - P_{saída}$ = perdas envolvidas no processo de conversão c.c./c.a. do inversor; P_{Perdas} (%) = $(P_{Perdas} / P_{FV}) \times 100\%$ = perdas percentuais envolvidas no processo de conversão c.c./c.a. do inversor.

Tabela 10 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de maio de 2020

Tempo (h)	P_{FV} (W)	$P_{saída}$ (W)	P_{Perdas} (W)	P_{Perdas} (%)
06:00	0,00	548,56	0,00	0,00
07:00	604,76	1152,42	56,19	9,29
08:00	1191,85	1750,50	39,43	3,31
09:00	1788,42	2077,03	37,93	2,12
10:00	2118,34	2313,45	41,32	1,95
11:00	2374,33	2372,42	60,88	2,56
12:00	2411,80	2195,35	39,38	1,63
13:00	2230,23	1661,15	34,88	1,56
14:00	1712,76	1182,46	51,61	3,01
15:00	1202,74	427,08	20,28	1,69
16:00	486,33	0,00	59,25	12,18
17:00	0,00	0,00	0,00	0,00
18:00	0,00	0,00	0,00	0,00
19:00	0,00	548,56	0,00	0,00

Fonte: Autores (2021)

onde:

 P_{FV} = potência fornecida pelo gerador fotovoltaico; $P_{saída}$ = potência de saída do inversor; P_{Perdas} (W) = $P_{FV} - P_{saída}$ = perdas envolvidas no processo de conversão c.c./c.a. do inversor; P_{Perdas} (%) = $(P_{Perdas} / P_{FV}) \times 100\%$ = perdas percentuais envolvidas no processo de conversão c.c./c.a. do inversor.

Tabela 11 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de junho de 2020

Tempo (h)	P_{FV} (W)	$P_{saída}$ (W)	P_{Perdas} (W)	P_{Perdas} (%)
06:00	0,00	0,00	0,00	0,00
07:00	456,65	396,67	59,98	13,13
08:00	1100,99	1092,30	8,69	0,79
09:00	1661,62	1631,34	30,29	1,82
10:00	2138,93	2106,63	32,30	1,51
11:00	2295,04	2254,43	40,61	1,77
12:00	2258,25	2224,90	33,35	1,48
13:00	2152,61	2106,63	45,98	2,14
14:00	1672,45	1631,34	41,11	2,46
15:00	1177,05	1122,37	54,68	4,65
16:00	486,91	427,08	59,83	12,29
17:00	0,00	0,00	0,00	0,00
18:00	0,00	0,00	0,00	0,00
19:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autores (2021)

onde:

 P_{FV} = potência fornecida pelo gerador fotovoltaico; $P_{saída}$ = potência de saída do inversor; P_{Perdas} (W) = $P_{FV} - P_{saída}$ = perdas envolvidas no processo de conversão c.c./c.a. do inversor; P_{Perdas} (%) = $(P_{Perdas} / P_{FV}) \times 100\%$ = perdas percentuais envolvidas no processo de conversão c.c./c.a. do inversor.

Tabela 12 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de outubro de 2020

Tempo (h)	P_{FV} (W)	$P_{saída}$ (W)	P_{Perdas} (W)	P_{Perdas} (%)
06:00	0,00	0,00	0,00	0,00
07:00	236,60	183,40	53,20	22,49
08:00	780,94	730,34	50,60	6,48
09:00	1388,55	1362,40	26,16	1,88
10:00	1838,11	1809,99	28,12	1,53
11:00	1984,38	1928,81	55,57	2,80
12:00	2371,00	2313,45	57,55	2,43
13:00	2378,76	2342,94	35,81	1,51
14:00	2210,53	2165,79	44,74	2,02
15:00	1704,90	1661,15	43,75	2,57
16:00	1305,63	1272,50	33,13	2,54
17:00	805,54	760,58	44,96	5,58
18:00	260,66	213,91	46,75	17,94
19:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autores (2021)

onde:

P_{FV} = potência fornecida pelo gerador fotovoltaico;

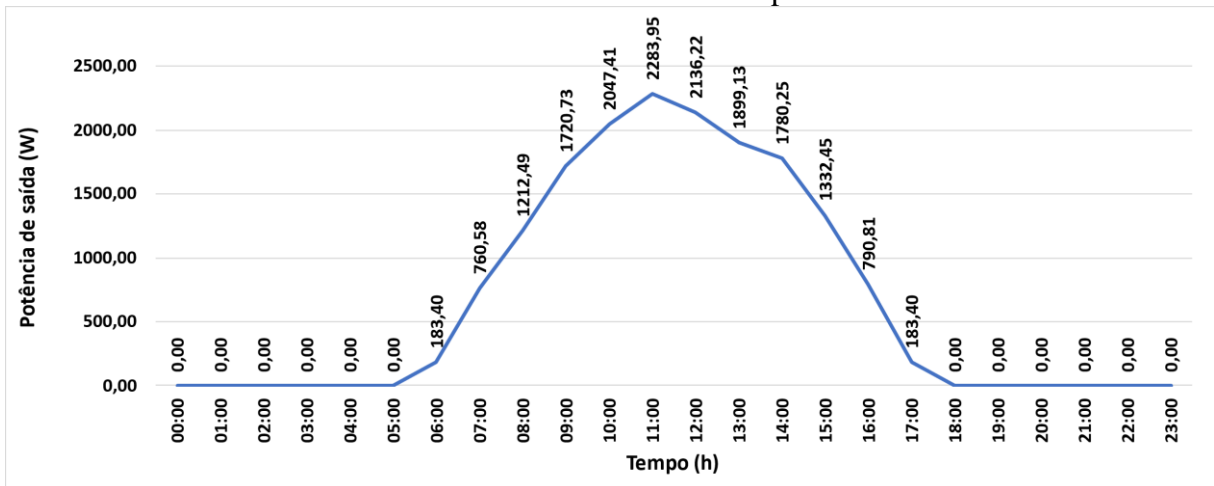
$P_{saída}$ = potência de saída do inversor;

P_{Perdas} (W) = $P_{FV} - P_{saída}$ = perdas envolvidas no processo de conversão c.c./c.a. do inversor;

P_{Perdas} (%) = $(P_{Perdas} / P_{FV}) \times 100\%$ = perdas percentuais envolvidas no processo de conversão c.c./c.a. do inversor.

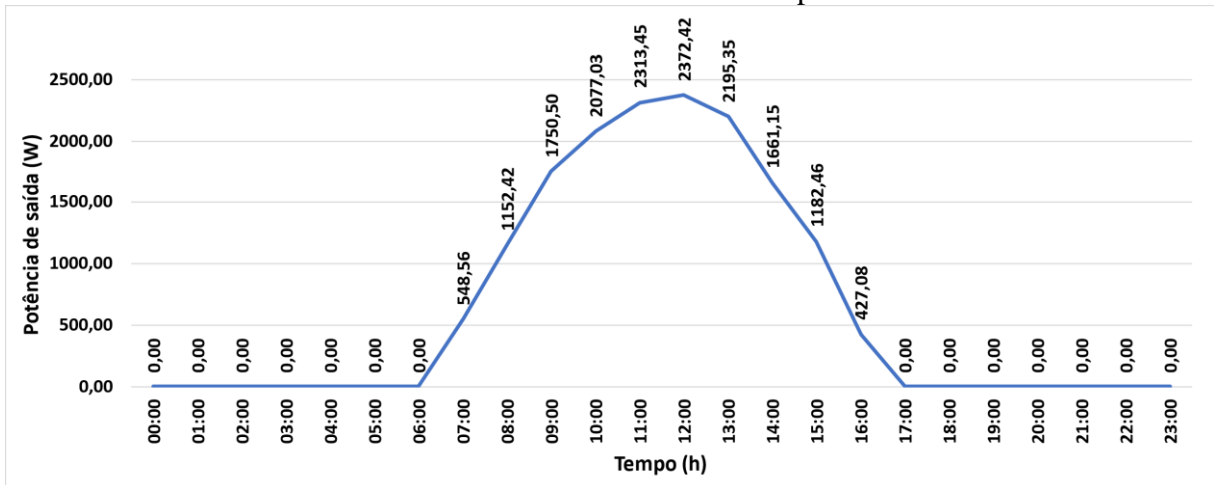
Os dados de potência de saída do inversor obtidos nas tabelas anteriores são representados a partir do Gráfico 14 até o Gráfico 17.

Gráfico 14 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de fevereiro de 2020



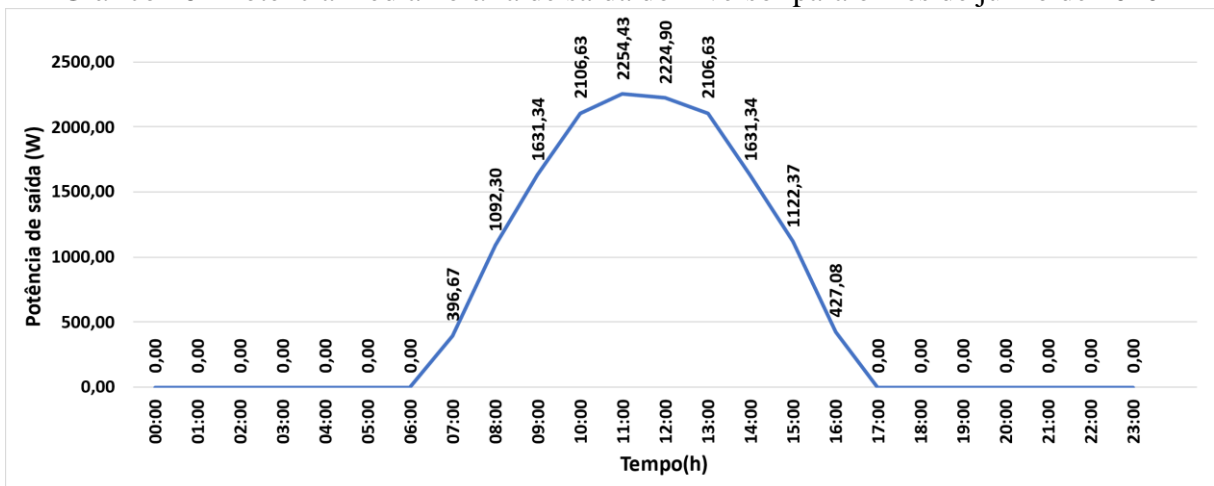
Fonte: Autores (2021)

Gráfico 15 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de maio de 2020



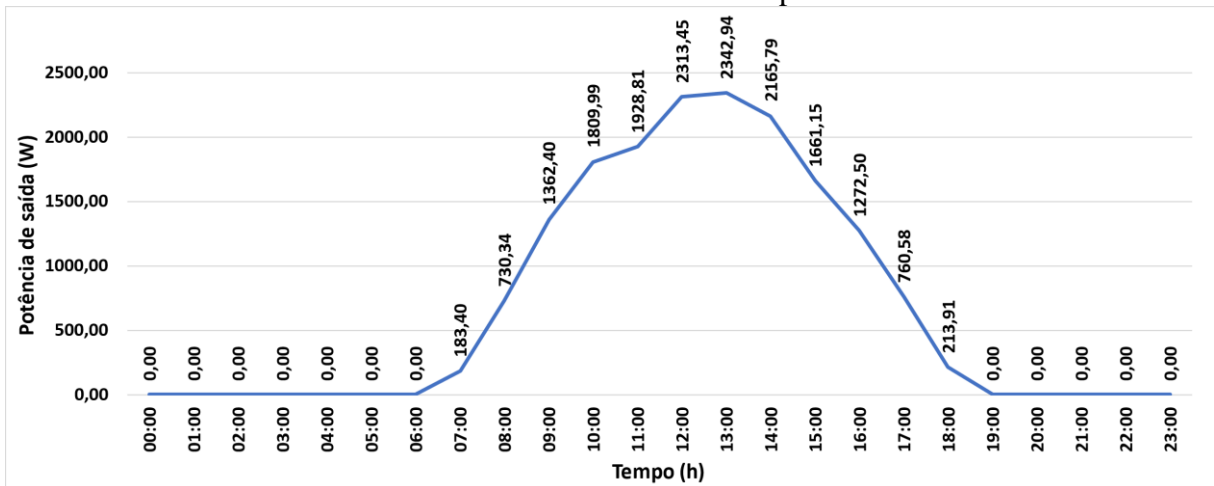
Fonte: Autores (2021)

Gráfico 16 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de junho de 2020



Fonte: Autores (2021)

Gráfico 17 - Potência média horária de saída do inversor para o mês de outubro de 2020



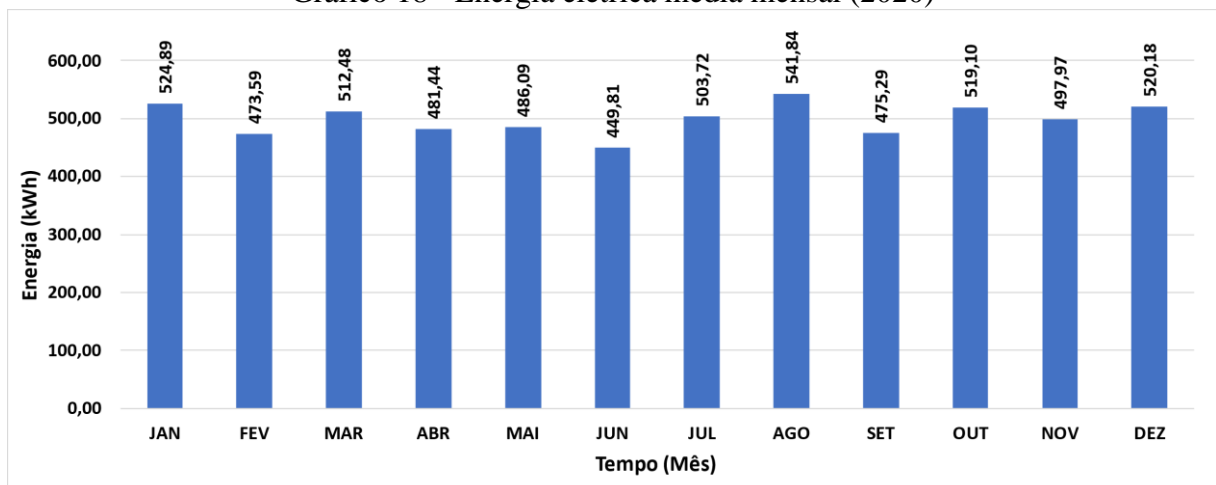
Fonte: Autores (2021)

Conclui-se, por meio dos gráficos apresentados acima, que o inversor consegue fornecer uma potência satisfatória ao longo do ano. A curva se assemelha aos gráficos de comparações de dados das estações EMC e INMET (Gráfico 1 até o Gráfico 12), em que a potência vai crescendo gradualmente no período da manhã, atinge um valor de pico no período a tarde e decresce gradualmente até anoitecer.

4.5 ENERGIA ELÉTRICA GERADA

O Gráfico 18 representa a quantidade média de energia elétrica obtida ao final de cada mês de 2020.

Gráfico 18 - Energia elétrica média mensal (2020)



Fonte: Autores (2021)

A partir das informações apresentadas pelo Gráfico 18, percebe-se que é possível aproveitar os benefícios da energia solar ao longo de todo ano, inclusive em meses com menor incidência solar, como é o caso do mês de junho que produziu a menor quantidade de energia elétrica no ano de 2020 e, ainda assim, conseguiu produzir uma quantidade satisfatória. Desse modo, o desempenho do inversor de frequência escolhido consegue cumprir suas funções de maneira adequado no local escolhido para a simulação (LAMAF).

A energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico foi de 5.986,41 kWh/ano. Considerando o preço da tarifa do kWh cobrado pela Enel¹¹ (R\$ 0,4981), o valor economizado para o ano estudado (2020) é $R\$ 0,4981 \times 5.986,41 = R\$ 2.981,83/\text{ano}$. Como o valor inicial do projeto ficou estimado em R\$ R\$ 20.216,04¹² (US\$ 3.979,54). e considerando que o valor médio de economia para os próximos anos se mantenha em R\$ 2.981,83 (US\$ 586,97), o valor investido será recuperado em pouco menos de 7 anos (aproximadamente 6 anos e 9 meses). Ainda que o retorno financeiro seja de médio a longo prazo, a implantação de um SFCR oferece vários benefícios que vão além de questões financeiras, mas também ambientais, contribuindo assim para uma geração de energia elétrica mais limpa e renovável.

¹¹ <https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/one-hub-brasil---2018/tarifas-taxas-impostos/goi%C3%A1s/Cartaz%20Reajuste%20Tarif%C3%A1rio%202019.pdf>

¹² Cotação de junho de 2021.

5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi realizada uma breve explanação sobre os módulos solares, utilizados no mundo e no Brasil, sendo estes dispositivos fundamentais para a geração de energia elétrica fotovoltaica. Dentre as atuais fontes de energia disponíveis, a energia solar apresenta um bom potencial quando comparada a energia proveniente de combustíveis fósseis ou de origem nuclear. Por permitir a possibilidade de ser gerada no ponto de utilização, não são necessários grandes investimentos em sistemas de transmissão e o Brasil possui uma boa incidência solar em grande parte do seu território durante todo o ano. A situação atual desta fonte no mercado interno está longe de atingir a maturidade, a sociedade brasileira ainda vai esperar por décadas para aquisição em larga escala de energia fotovoltaica. É essencial os benefícios do uso da energia fotovoltaica e o potencial do Brasil para sua utilização.

Dessa forma, é possível quebrar o paradigma que impede o desenvolvimento e insira esta energia renovável na matriz energética do Brasil e desta forma, estimular o estabelecimento de um mecanismo de incentivo para considerá-lo. Políticas para acelerar a aplicação de energias renováveis no mercado dos países em desenvolvimento, especialmente o Brasil, podem acompanhar a experiência de sucesso em países desenvolvidos. Além disso, o tempo de retorno financeiro para o estudo de caso realizado por de aproximadamente 6 anos e 9 meses, demonstrando assim que o investimento necessário para a implementação de SFGR traz lucros após alguns anos de operação, ainda que seja à longo prazo.

Este Projeto Final de Curso é uma contribuição às atividades do projeto de extensão “Transferência de conhecimentos e criação do Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica, como estratégias na implementação das Novas Diretrizes Curriculares dos Cursos de Engenharia”, como material didático da área, a ser disponibilizado para a sociedade.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Aneel**, c2021. Página inicial. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em 16 out. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **ABSOLAR**, c2020. Página inicial. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/>. Disponível em 18 out. 2020.

ENERGIA Solar no Brasil. **Portal Solar**, 07 ago. 2018. Página inicial. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>. Acesso em 15 out. 2020.

INVERSOR de frequência – o que é e como funciona. **Athos Eletronics**, 07 mar. 2018. Disponível em: <https://athoselectronics.com/inversor-de-frequencia/>. Acesso em 05 maio. 2021.

INVERSOR grid tie. **Portal Solar**, 07 ago. 2018. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/inversor-grid-tie.html>. Acesso em 10 maio. 2021.

INVERSOR solar híbrido. **Portal Solar**, 11 maio. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/inversor-solar-hibrido>. Acesso em 08 jun. 2021.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Inmet**: Instituto Nacional de Meteorologia, c2021. Página inicial. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 out. 2020

O Inversor Solar. **Portal Solar**, 07 ago. 2018. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/o-inversor-solar.html>. Acesso em: 08 jun. 2021.

PLANAS, Oriol. O que é radiação solar? **Energia Solar**, 04 maio. 2020. Disponível em: <https://pt.solar-energia.net/que-e-energia-solar/radiacao-solar>. Acesso em: 03 março. 2020.

PINHO, Joao Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPTEL - CRESESB. Rio de Janeiro, 2014.

POR que energia solar é importante. **Portal solar**, 07 nov. 2019. Disponível em: [view-source:https://www.portalsolar.com.br/por-que-energia-solar-importante.html](https://www.portalsolar.com.br/por-que-energia-solar-importante.html). Acesso em 04 abr. 2021.

QUAIS as vantagens e desvantagens dos sistemas on-grid e off-grid? **Solarion**, 29 jan. 2019. Disponível em: [view-source:https://energiasolarion.com.br/blog/vantagens-on-grid-off-grid/](https://energiasolarion.com.br/blog/vantagens-on-grid-off-grid/). Acesso em: 08 jun. 2021.

RIZÉRIO, Lara; YAZBEK, Priscila. Especialistas falam em risco de apagão energético; veja impactos da crise de energia na Bolsa e na economia. **InfoMoney**, 28 maio. 2021. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/mercados/especialistas-falam-em-risco-de-apagao-energetico-veja-impactos-da-crise-de-energia-na-bolsa-e-na-economia/>. 30 maio. 2021.

RUY, F. Painel Solar Fotovoltaico: Sua Criação e História. **BlueSol**, 28 jun. 2017. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/painel-solar-fotovoltaico-criacao-historia-marcos>. Acesso em 29 set. 2020.

SANTANA, Bruno. Quais as diferenças entre os tipos de sistema fotovoltaicos on grid e off grid? **BMS Energia Solar**, 24 jun. 2020. Disponível em: <view-source:https://bmsenergiasolar.com.br/on-grid-e-off-grid/>. Acesso em 08 jun. 2021.

SANTOS, Thuany. Sistema fotovoltaico híbrido. **Oca Solar Energia**, 28 abr. 2021. Disponível em: <https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/sistema-fotovoltaico-hibrido-entenda-o-que-e/>. Acesso em: 07 jun. 2021.

SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira; FILHO, Kepler de Souza Oliveira. Sistemas de Coordenadas. **Astronomia e Física: UFRGS**, 3 jan. 2019. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/coord.htm>. Acesso em 05 mar. 2021.

SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira; FILHO, Kepler de Souza Oliveira. Movimento anual do Sol e Estações do ano. **Astronomia e Física: UFRGS**, 3 jan. 2019. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aula_movsol. Acesso em 06 mar. 2021.

SILVA, Thalles André da. Inversor de Frequência. **Mettzer**, c2021. Disponível em: <https://www.mettzer.com/projects/inversor-de-frequencia-5fdea968b5983d0018d3e50c>. Acesso em 28 abr. 2021.

SISTEMA Solar On Grid (Conectado à Rede). **Portal Solar**, 19 dez. 2019. Disponível em: <view-source:https://www.portalsolar.com.br/sistema-solar-conectado-a-rede-on-grid>. Acesso em: 07 jun. 2021.

SISTEMA solar on-grid e off-grid. **Martins Solar**, 16 mar. 2020. Disponível em: https://solarmartins.com.br/sistema-solar-on-grid-e-off-grid/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=sistema-solar-on-grid-e-off-grid. Acesso em: 08 jun. 2021.

SISTEMAS on grid e off grid. **Strom Brasil**, 08 fev. 2018. Disponível em: <view-source:https://www.strombrasil.com.br/sistemas-on-grid-e-off-grid/>. Acesso em: 07 jun. 2021

SOUZA, Rafaela. Atmosfera Terrestre. **Mundo Educação**, 09 out. 2018. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/atmosfera-terrestre.htm>. Acesso em 03 jun. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. **Projeto Solar EMC**, c2020. Página inicial. Disponível em: <https://projetosolar.emc.ufg.br/>. Acesso em 12 out. 2020.

ZILLES, Roberto; *et al.* **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Oficina de Textos. São Paulo, 2012.

ANEXO A - Datasheet: Módulos solares



HiKu

MÓDULO PERC POLY SUPER ALTA POTÊNCIA

325W ~ 350W

CS3L-325 | 330 | 335 | 340 | 345 | 350P

MAIS POTÊNCIA



24 % mais potência do que os módulos convencionais



Um LCOE até 4,5 % menor
Um custo de sistema até 2,7 % menor



Baixo NMOT: 42 ± 3 °C
Baixo coeficiente de temperatura (Pmax): $-0,36$ % / °C



Melhor tolerância a sombra

MAIS CONFIÁVEL



Corrente interna baixa, temperatura de ponto quente mais baixa



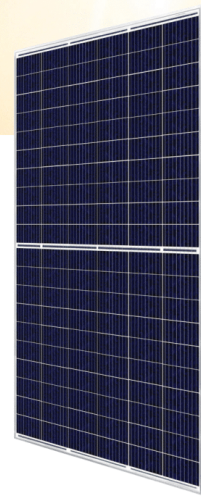
Minimiza o impacto das microtrincas



Carga pesada de neve de até 5400 Pa, carga de vento de até 3600 Pa*

* Para informações detalhadas, consulte o Manual de Instalação.

 CanadianSolar



*O produto de quadro preto pode ser fornecido sob encomenda.

25
anos

Garantia de saída de potência linear*

12
anos

Garantia de produto estendida relativa a materiais e mão-de-obra*

*Conforme a declaração de garantia limitada aplicável da Canadian Solar.

CERTIFICADOS DO SISTEMA DE GESTÃO*

ISO 9001:2015 / Sistema de Gestão da Qualidade
ISO 14001:2015 / Padrões para o Sistema de Gestão Ambiental
OHSAS 18001:2007 / Norma Internacional de Segurança e Saúde Ocupacional

CERTIFICADOS DO PRODUTO*

IEC 61215 / IEC 61730: VDE / CE / MCS / INMETRO
UL 1703 / IEC 61215 desempenho: Registro CEC (EUA) / FSEC (EUA Flórida)
UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE / IEC 60068-2-68: SGS
UNI 9177 Reação a chamas: Classe 1 / Take-e-way

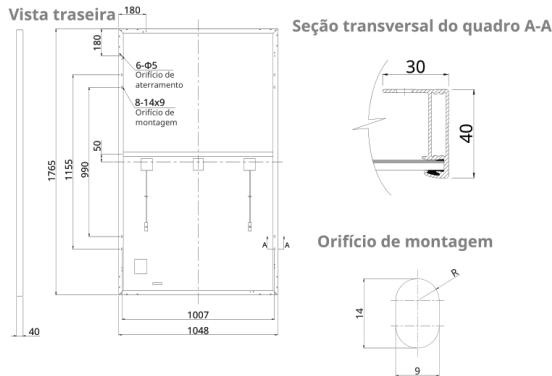
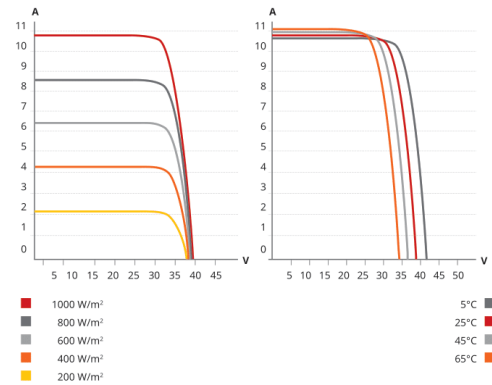


* Uma vez que existem diversos requisitos de certificação nos vários mercados, pedimos que contate o Representante de vendas da Canadian Solar, para saber os certificados específicos aplicáveis aos produtos e à região onde serão usados.

A **CANADIAN SOLAR BRASIL** tem o compromisso de fornecer produtos, serviços e soluções de alta qualidade em sistemas solares para clientes de todo o mundo. O fornecedor número 1, em termos de qualidade e relação desempenho/preço, segundo a pesquisa IHS Module Customer Insight Survey. Líder no desenvolvimento de projetos de sistemas PV e na fabricação de módulos solares, com mais de 40 GW implantados em todo o mundo, desde 2001.

CANADIAN SOLAR BRASIL

Av. Roque Petroni Junior, 999, 4º andar, Vila Gertrudes, São Paulo, Brasil, CEP 04707-910 | www.canadiansolar.com | sales.br@canadiansolar.com

DESENHO DE ENGENHARIA (mm)**CS3L-330P / CURVAS I-V****DADOS ELÉTRICOS | STC***

CS3L	325P	330P	335P	340P	345P	350P
Máx. Potência Nominal (Pmax)	325 W	330 W	335 W	340 W	345 W	350 W
Opt. Tensão de Operação (Vmp)	32,0 V	32,2 V	32,4 V	32,6 V	32,8 V	33,0 V
Opt. Corrente de Operação (Imp)	10,16 A	10,24 A	10,34 A	10,43 A	10,52 A	10,61 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	39,0 V	39,2 V	39,4 V	39,6 V	39,8 V	40,2 V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	10,74 A	10,82 A	10,90 A	10,98 A	11,06 A	11,24 A
Eficiência de Módulo	17,6%	17,8%	18,1%	18,4%	18,7%	18,9%
Temperatura de Operação	-40°C ~ +85°C					
Máx. Tensão de Sistema	1500V (IEC/UL) ou 1000V (IEC/UL)					
Desempenho antichamas do módulo	TIPO 1 (UL 1703) ou CLASSE C (IEC 61730)					
Máx. valor nominal do fusível de série	20 A					
Classe da aplicação	Classe A					
Tolerância de potência	0 ~ + 10 W					

* Sob condições de teste padrão (STC) de irradiância de 1000 W/m², espectro AM 1.5 e temperatura de célula de 25°C.

DADOS ELÉTRICOS | NMOT*

CS3L	325P	330P	335P	340P	345P	350P
Máx. Potência Nominal (Pmax)	242 W	246 W	249 W	253 W	257 W	261 W
Opt. Tensão de Operação (Vmp)	29,8 V	30,0 V	30,2 V	30,3 V	30,5 V	30,7 V
Opt. Corrente de Operação (Imp)	8,13 A	8,20 A	8,27 A	8,35 A	8,42 A	8,49 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	36,6 V	36,8 V	37,0 V	37,2 V	37,4 V	37,8 V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	8,66 A	8,73 A	8,79 A	8,86 A	8,92 A	9,07 A

* Sob temperatura nominal de operação do módulo (NMOT), irradiância de 800 W/m², espectro AM 1.5, temperatura ambiente de 20°C e velocidade do vento de 1 m/s.

DADOS MECÂNICOS

Especificação	Dados
Tipo de célula	Policristalina
Arranjo de células	120 [2 X (10 X 6)]
Dimensões	1765 X 1048 X 40 mm (69,5 X 41,3 X 1,57 pol.)
Peso	21,1 kg (46,5 lbs)
Capa dianteira	Vidro temperado de 3,2 mm
Quadro	Liga de Alumínio Anodizado, com barra transversal
Caixa J	IP68, 3 diodos de bypass
Cabo	4,0 mm ² (IEC), 12 AWG (UL)
Comprimento do cabo (Incluindo conector)	Retrato: 500 mm (19,7 pol.) (+) / 350 mm (13,8 pol.) (-); paisagem: 1250 mm (49,2 pol.)*
Conector	Série T4 ou H4 UTX ou MC4-EVO2
Por palete	27 peças
Por contêiner (40' HQ)	702 peças

* Para informações detalhadas, contate seu Representante de Vendas ou Representante Técnico local.

CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA

Especificação	Dados
Coefficiente de Temperatura (Pmax)	-0,36 % / °C
Coefficiente de Temperatura (Voc)	-0,28 % / °C
Coefficiente de Temperatura (Isc)	0,05 % / °C
Temperatura Nominal de Operação do Módulo	42 ± 3°C

SEÇÃO DE PARCEIROS

* As especificações e características principais contidas nesta ficha de dados poderão diferir ligeiramente das dos produtos reais, devido à inovação e melhorias efetuadas continuamente nestes produtos. A Canadian Solar Inc. se reserva o direito de fazer quaisquer ajustes necessários nas informações descritas aqui, a qualquer tempo, sem aviso. Alertamos que os módulos PV devem ser manuseados e instalados por pessoas profissionalmente qualificadas e que as instruções de segurança e de instalação devem ser lidas, cuidadosamente, antes do uso de nossos módulos PV.

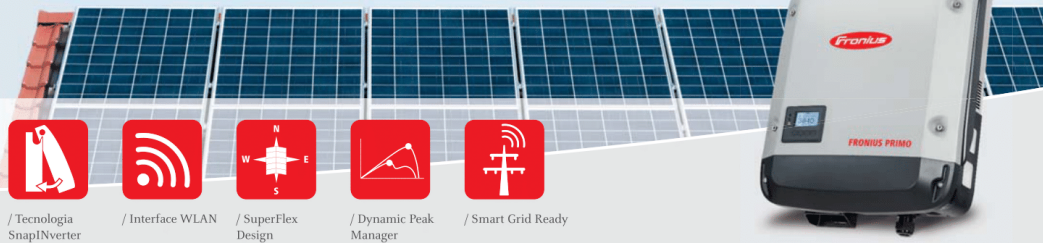
ANEXO B - Datasheet: Inversor

/ Perfect Welding / Solar Energy / Perfect Charging



FRONIUS PRIMO

/ O inversor comunicativo para gerenciamento de energia otimizada



/ Tecnologia SnapInverter

/ Interface WLAN

/ SuperFlex Design

/ Dynamic Peak Manager

/ Smart Grid Ready

/ O Fronius Primo com categorias de potência 3,0-8,2 kW completa perfeitamente a família SnapInverter. Este monofásico sem transformador é o inversor ideal para residências. Seu design inovador SuperFlex proporciona máxima flexibilidade na concepção do sistema, enquanto o sistema de montagem SnapInverter torna a instalação e manutenção mais fácil do que nunca. O pacote de comunicação padrão, inclui WLAN, gestão de energia, várias interfaces e muito mais, além disso, faz do Fronius Primo um inversor comunicativo aos usuários.

DADOS TÉCNICOS FRONIUS PRIMO (3.0-1, 3.5-1, 3.6-1, 4.0-1, 4.6-1)

DADOS DE ENTRADA	PRIMO 3.0-1	PRIMO 3.5-1	PRIMO 3.6-1	PRIMO 4.0-1	PRIMO 4.6-1
Max. corrente de entrada (Idc max1 / Idc max2)			12.0 A / 12.0 A		
Max. conjunto corrente curto-circuito (MPP1 / MPP2)			18.0 A / 18.0 A		
Min. tensão de entrada (Udc min)			80 V		
Feed-in tensão de entrada (Udc start)			80 V		
Tensão nominal de entrada (Udc,r)			710 V		
Max. tensão de entrada (Udc max)			1,000 V		
Faixa de tensão MPP (Umpp min - Umpp max)		200 - 800 V		210 - 800 V	240 - 800 V
Numero de rastreadores MPP			2		
Numero de conexões CC			2 + 2		

DADOS DE SAÍDA	PRIMO 3.0-1	PRIMO 3.5-1	PRIMO 3.6-1	PRIMO 4.0-1	PRIMO 4.6-1
Tensão nominal de saída (Pac,r)	3,000 W	3,500 W	3,680 W	4,000 W	4,600 W
Max.potência de saída	3,000 VA	3,500 VA	3,680 VA	4,000 VA	4,600 VA
Max. corrente de saída (Iac max)	13.0 A	15.2 A	16.0 A	17.4 A	20.0 A
Conexão a rede (faixa de tensão)	1 - NPE 220 V / 230 V (180 V - 270 V)				
Frequencia	50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)				
Distorção harmônica total	< 5 %				
Fator de potência (cos φac,r)	0.85 - 1 ind. / cap.				

DADOS TÉCNICOS FRONIUS PRIMO (3.0-1, 3.5-1, 3.6-1, 4.0-1, 4.6-1)

DADOS GERAIS	PRIMO 3.0-1	PRIMO 3.5-1	PRIMO 3.6-1	PRIMO 4.0-1	PRIMO 4.6-1
Dimensões (height x width x depth)	645 x 431 x 204 mm				
Peso	21.5 kg				
Grau de proteção	IP 65				
Classe de proteção	1				
Categoria de sobrecarga (CC/CA) ¹⁾	2 / 3				
Consumo noturno	< 1 W				
Design do inversor	Sem transformador				
Resfriamento	Refrigeração de ar comprimido				
Instalação	Montagem interna e externa				
Faixa de temperatura ambiente	-40 - +55 °C				
Umidade relativa permitida	0 - 100 %				
Max. altitude	4,000 m				
Tecnologia de conexão	2x DC+1, 2x DC+2 and 4x DC- parafusos terminais 2.5 - 16 mm ²				
Tecnologia de conexão rede	3-pin CA de parafusos terminais 2,5 a 16 mm ²)				
Certificados	DIN V VDE 0126-1-1/A1, IEC 62109-1/-2, IEC 62116, IEC 61727, AS 3100, AS 4777-2, AS 4777-3, G83/2, G59/3, CEI 0-21, ABNT NR 16149				

EFICIÊNCIA	PRIMO 3.0-1	PRIMO 3.5-1	PRIMO 3.6-1	PRIMO 4.0-1	PRIMO 4.6-1
Max. eficiência	97.6 %	97.7 %	97.7 %	97.7 %	97.8 %
Eficiência Europeia (η _{EU})	96.1 %	96.8 %	96.8 %	97.0 %	97.0 %
η at 5 % P _{ac,r} ²⁾	80.8 / 82.5 / 82.5 %	80.8 / 82.5 / 82.5 %	80.8 / 82.5 / 82.5 %	80.8 / 82.5 / 82.5 %	80.8 / 82.5 / 82.5 %
η at 10 % P _{ac,r} ²⁾	84.1 / 86.5 / 86.1 %	86.3 / 93.6 / 91.8 %	86.3 / 93.6 / 91.8 %	86.6 / 93.9 / 92.2 %	88.9 / 94.4 / 92.9 %
η at 20 % P _{ac,r} ²⁾	90.3 / 95.5 / 94.8 %	91.6 / 96.2 / 95.2 %	91.6 / 96.2 / 95.2 %	92.2 / 96.7 / 95.6 %	93.0 / 97.0 / 95.9 %
η at 25 % P _{ac,r} ²⁾	91.8 / 96.4 / 95.1 %	92.7 / 96.9 / 95.8 %	92.7 / 96.9 / 95.8 %	93.2 / 97.2 / 96.1 %	93.9 / 97.2 / 96.6 %
η at 30 % P _{ac,r} ²⁾	92.7 / 96.9 / 96.0 %	93.5 / 97.2 / 96.3 %	93.5 / 97.2 / 96.3 %	94.0 / 97.2 / 96.8 %	94.5 / 97.3 / 96.9 %
η at 50 % P _{ac,r} ²⁾	94.5 / 97.4 / 97.0 %	95.0 / 97.7 / 97.3 %	95.0 / 97.7 / 97.3 %	95.2 / 97.8 / 97.4 %	95.6 / 97.9 / 97.6 %
η at 75 % P _{ac,r} ²⁾	95.4 / 97.9 / 97.7 %	95.6 / 97.8 / 97.8 %	95.6 / 97.8 / 97.8 %	95.8 / 97.9 / 97.8 %	96.0 / 97.9 / 97.8 %
η bei 100 % P _{ac,r} ²⁾	95.7 / 97.9 / 97.8 %	95.8 / 98.0 / 97.8 %	95.8 / 98.0 / 97.8 %	95.9 / 98.0 / 97.9 %	96.2 / 97.9 / 98.0 %
MPP adaptação eficiente	> 99.9 %				

DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO	PRIMO 3.0-1	PRIMO 3.5-1	PRIMO 3.6-1	PRIMO 4.0-1	PRIMO 4.6-1
Medição de isolamento CC	Sim				
Comportamento de sobrecarga	Mudança do ponto de operação, limitação da produção				
Disjuntor CC	Sim				

INTERFACES	PRIMO 3.0-1	PRIMO 3.5-1	PRIMO 3.6-1	PRIMO 4.0-1	PRIMO 4.6-1
WLAN / Ethernet LAN	Fronius Solarweb, Modbus TCP SunSpec, Fronius Solar API (JSON)				
6 entradas ou 4 digital in/out	Interface com receptor de telecomando				
USB (A socket)	Para entradas USB				
2 x RS422 (RJ45 socket) ³⁾	Fronius Solar Net				
Saída de sinal ³⁾	Gerenciamento de energia (saída de relé livre de potencial)				
Datalogger and Webservice	Integrado				
Entrada externa ³⁾	Medidor de conexão S0 / Avaliação da proteção da sobretensão				
RS485	Modbus RTU SunSpec ou medidor de conexão				

¹⁾De acordo com IEC 62109-1.²⁾E at U_{mpp} min / U_{dc,r} / U_{mpp} max³⁾Também disponível na versão leve.

Sujeito a modificações