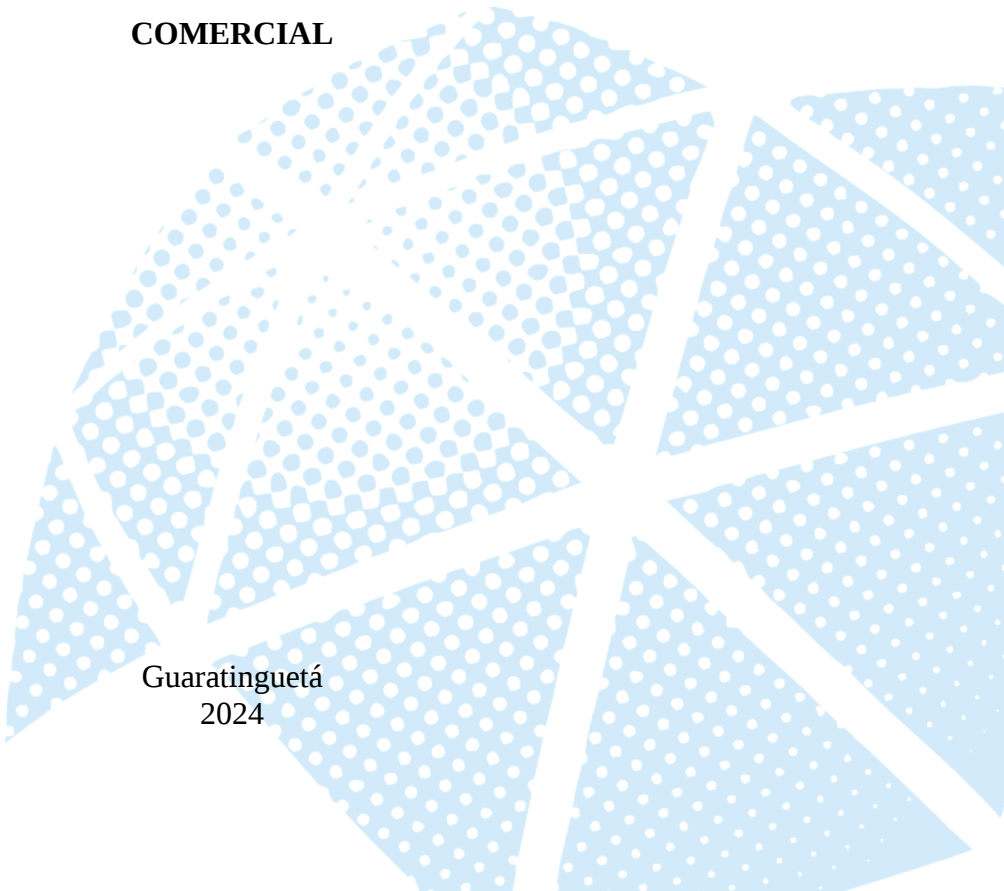


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - Campus de Guaratinguetá

STEFANY MAXIMO ALVES

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO ON-GRID E OFF-GRID PARA UMA INSTALAÇÃO
COMERCIAL**

Guaratinguetá
2024



STEFANY MAXIMO ALVES

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO ON-GRID E OFF-GRID PARA UMA INSTALAÇÃO
COMERCIAL**

Trabalho de Graduação apresentada à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá,
Guaratinguetá, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Raphaela Carvalho
Machado

Guaratinguetá
2024

A474e	Alves, Stefany Máximo Estudo comparativo entre o dimensionamento de um sistema fotovoltaico On-Grid e Off-Grid para uma instalação comercial / Stefany Máximo Alves - Guaratinguetá, 2024. 80 f : il. Bibliografia: f. 76-79 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024. Orientadora: Prof.^a Dr.^a Raphaela Carvalho Machado 1. Energia solar. 2. Geração de energia fotovoltaica. 3. Energia - Fontes alternativas. I. Título. CDU 620.91
-------	---

STEFANY MAXIMO ALVES

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO ON-GRID E OFF-GRID PARA UMA INSTALAÇÃO
COMERCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data da defesa: 26/11/2024

Banca Examinadora:



Prof. Dra. RAPHAELA CARVALHO MACHADO

UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - Campus de Guaratinguetá



Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA

Universidade Estadual Paulista (UNESP)



Prof. Dr. CARLOS AUGUSTO MARCONDES DOS SANTOS

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe e ao meu irmão por todo o apoio e força que me deram, mas principalmente os agradeço por terem me dado a oportunidade de ter chegado até aqui.

À minha irmã, por ter me motivado quando duvidei de mim mesma e por ter concedido o local para fazer este trabalho. Ao meu pai, por todo o auxílio durante minha formação. À minha amiga, Mariana, que me apoiou nos momentos em que mais precisei.

Por fim, agradeço a minha orientadora, Prof^a. Raphaela Machado, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A energia solar é uma das energias limpas mais promissoras e utilizadas na atualidade, porém o maior uso dos sistemas de geração solar é voltado para o uso residencial. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é apresentar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico para uma instalação comercial, baseado em uma instalação real. Para fins comparativos, o projeto de um sistema *on-grid* e de um sistema *off-grid* é apresentado. Como estudo de caso foram utilizados dados de um ponto comercial da área alimentícia localizado na cidade de Guaratinguetá. A metodologia aplicada foi baseada no consumo médio de energia elétrica da instalação, levantado a partir das faturas de energia elétrica do imóvel. A partir do valor médio de consumo de energia elétrica foi realizado o dimensionamento dos dois tipos de sistema fotovoltaicos e comparada a viabilidade de instalação de cada um. Por fim, com os resultados obtidos concluiu-se que o sistema *on-grid* é a solução mais viável no caso estudado e que este tipo de sistema apresenta maior confiabilidade para as instalações comerciais.

PALAVRAS-CHAVE: energia solar; sistemas fotovoltaicos; sistemas *on-grid*; sistemas *off-grid*.

ABSTRACT

Solar energy is one of the most promising and widely used clean energies nowadays, but most solar generation systems are used for residential purposes. The aim of this paper is therefore to present the sizing of a photovoltaic system for a commercial installation, based on a real installation. For comparative purposes, the design of an on-grid system and an off-grid system is presented. As a case study, data from a food business located in the city of Guaratinguetá was used. The methodology applied was based on the installation's average electricity consumption, collected from the property's electricity bills. Based on the average electricity consumption, the two types of photovoltaic system were sized and the feasibility of installing each one was compared. Finally, with the results obtained, it was concluded that the on-grid system is the most viable solution in the case studied and that this type of system is more reliable for commercial installations.

KEYWORDS: solar energy; photovoltaic system; on-grid system; off-grid system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).....	13
Figura 2 - Tipos de radiação.....	17
Figura 3 - Ferramenta de consulta de insolação diária no território nacional.	18
Figura 4 - Posição da Terra ao longo do ano.....	18
Figura 5 - Altura solar ao longo do ano.	19
Figura 6 - Junção PN.....	20
Figura 7 - Célula fotovoltaica.....	20
Figura 8 - Painéis fotovoltaicos.	21
Figura 9 - Processo de fabricação dos lingotes de silício monocristalino.....	22
Figura 10 - Lâmina e célula fotovoltaica de silício monocristalino.	22
Figura 11 - Lingote de silício policristalino.	23
Figura 12 - Lâmina e célula fotovoltaica de silício policristalino.	23
Figura 13 - Estrutura de um painel fotovoltaico.....	25
Figura 14 - Curvas características de um painel fotovoltaico.	26
Figura 15 - Relação de irradiância e temperatura com a geração de energia nos painéis fotovoltaicos.	27
Figura 16 - Orientação dos módulos voltados para o norte geográfico.	29
Figura 17 - Espaçamento entre módulos.....	30
Figura 18 - Dimensões da instalação dos módulos.....	31
Figura 19 - Componentes dos sistemas fotovoltaicos autônomos.	32
Figura 20 - Bateria estacionária de chumbo ácido.....	34
Figura 21 - Ciclos de uso de uma bateria em função da profundidade de descarga.	35
Figura 22 - Controlador de carga com MPPT.	36
Figura 23 - Inversor <i>off-grid</i>	37
Figura 24 - Circuito básico de funcionamento dos inversores.	38
Figura 25 - Formas de onda dos inversores.....	38
Figura 26 - Componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.	40
Figura 27 - Medidor bidirecional (monofásico).	41
Figura 28 - Inversor <i>on-grid</i>	42
Figura 29 - Telhado da instalação.....	44
Figura 30 - Irradiação solar diária média na região da instalação.	46
Figura 31 - Orientação da instalação dos módulos na vertical x horizontal.	52

Figura 32 - Disposição dos módulos no telhado (sistema <i>off-grid</i>).....	53
Figura 33 - Diagrama unifilar do projeto <i>off-grid</i>	57
Figura 34 - Gráfico da geração anual do sistema <i>off-grid</i>	60
Figura 35 - Disposição dos módulos no telhado (sistema <i>on-grid</i>).	62
Figura 36 - Diagrama unifilar do projeto <i>on-grid</i>	64
Figura 37 - Gráfico da geração anual do sistema <i>on-grid</i>	67
Figura 38 - Planilha de cálculo dimensionamento <i>off-grid</i>	69
Figura 39 - Dados de entrada da planilha <i>off-grid</i>	69
Figura 40 - Dados de saída da planilha <i>off-grid</i>	70
Figura 41 - Estimativa da geração de energia anual.	70
Figura 42 - Análise da disposição dos módulos.	71
Figura 43 - Planilha de cálculo dimensionamento <i>on-grid</i>	72
Figura 44 - Dados de entrada da planilha <i>on-grid</i>	72
Figura 45 - Dados de saída da planilha <i>on-grid</i>	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potência fotovoltaica instalada por classe de consumo em 2023.....	14
Tabela 2 - Relação entre latitude geográfica e ângulo de inclinação do módulo.	29
Tabela 3 - Potência instalada no ponto comercial.	45
Tabela 4 - Relação do consumo mensal da instalação.	46
Tabela 5 - Especificações técnicas elétricas módulo CS6W-540MS.	50
Tabela 6 - Especificações técnicas mecânicas módulo CS6W-540MS.	51
Tabela 7 - Parâmetros para o cálculo do número de módulos.....	51
Tabela 8 - Especificações técnicas bateria 12MS234.....	53
Tabela 9 - Parâmetros para o cálculo do banco de baterias.....	54
Tabela 10 - Especificações técnicas controlador de carga 10415AN.....	55
Tabela 11 - Especificações técnicas inversor IP3000-41.....	56
Tabela 12 - Resumo do sistema <i>off-grid</i>	56
Tabela 13 - Equipamentos do sistema <i>off-grid</i>	57
Tabela 14 - Disjuntores CC do sistema <i>off-grid</i>	58
Tabela 15 - Disjuntor CA do sistema <i>off-grid</i>	59
Tabela 16 - DPS CC do sistema <i>off-grid</i>	59
Tabela 17 - DPS CA do sistema <i>off-grid</i>	60
Tabela 18 - Especificações técnicas FRONIUS 8.2-1.	63
Tabela 19 - Resumo do sistema <i>on-grid</i>	64
Tabela 20 - Equipamentos do sistema <i>on-grid</i>	65
Tabela 21 - Disjuntor CC do sistema <i>on-grid</i>	65
Tabela 22 - DPS CC do sistema <i>on-grid</i>	66
Tabela 23 - Disjuntor CA do sistema <i>on-grid</i>	66
Tabela 24 - DPS CA do sistema <i>on-grid</i>	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
IEC	International Electrotechnical Commission
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NBR	Norma Técnica Brasileira
NOTC	Nominal Operating Cell Temperature
STC	Standard Test Conditions

LISTA DE SÍMBOLOS

Ah	Ampère-hora
h	hora
A	Ampère
m	metro
m ²	metro cuadrado
W	Watt
Wh	Watt-hora
V	Volt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	ENERGIA SOLAR	17
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	19
2.2.1	Painéis fotovoltaicos	21
2.2.1.1	Tipos de células fotovoltaicas.....	21
2.2.1.2	Estrutura.....	24
2.2.1.3	Especificações técnicas dos módulos	25
2.2.1.4	Instalação de painéis fotovoltaicos.....	28
2.3	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	31
2.3.1	Sistemas <i>off-grid</i>	31
2.3.1.1	Componentes do sistema <i>off-grid</i>	33
2.3.2	Sistemas <i>on-grid</i>.....	40
2.3.2.1	Componentes do sistema <i>on-grid</i>	41
2.4	NORMAS E REGULAMENTAÇÕES APLICÁVEIS	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	LOCALIZAÇÃO E ÁREA LIVRE PARA INSTALAÇÃO.....	44
3.2	POTÊNCIA INSTALADA.....	45
3.3	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	45
3.4	IRRADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO.....	46
3.5	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	47
3.5.1	Equações aplicáveis	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	DIMENSIONAMENTO <i>OFF-GRID</i>	50
4.1.1	Conjunto de módulos	51
4.1.2	Banco de baterias	53
4.1.3	Controlador de carga	54
4.1.4	Inversor.....	55
4.1.5	Parâmetros especificados para o sistema <i>off-grid</i>	56

4.1.6	Diagrama elétrico	56
4.1.7	Dispositivos de proteção	57
4.1.8	Geração de energia.....	60
4.2	DIMENSIONAMENTO <i>ON-GRID</i>	61
4.2.1	Conjunto de módulos	61
4.2.2	Inversor.....	63
4.2.3	Parâmetros especificados para o sistema <i>on-grid</i>	63
4.2.4	Diagrama elétrico	64
4.2.5	Dispositivos de proteção	65
4.2.6	Geração de energia.....	67
4.3	PLANILHA DE CÁLCULO	68
5	CONCLUSÃO	74
5.1	TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS.....	76
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	78
	ANEXO A – FOLHA DE DADOS TÉCNICOS MÓDULO FOTOVOLTAICO	80

1 INTRODUÇÃO

O uso de fontes de energias renováveis tem crescido muito nas últimas décadas, devido principalmente ao aumento das mudanças climáticas e a crescente preocupação em diminuir ou retardar os efeitos do aquecimento global.

Sob essa perspectiva, a aplicação e estudo de fontes de energias renováveis tem um papel fundamental na implementação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que constituem 17 metas globais criadas pela Organização das Nações Unidas (ONU) conforme apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).



Fonte: Nações Unidas Brasil (2024).

Dentro do escopo deste trabalho, o qual aborda o uso de energia solar, o investimento neste tipo de energia se enquadra principalmente nos objetivos de: energia limpa e acessível (ODS 7), cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11) e ação contra mudança do clima global (ODS 13).

Entre as diversas fontes de energia alternativa, a energia solar fotovoltaica tem se destacado mundialmente por sua disponibilidade, versatilidade, custo reduzido e baixa manutenção. A radiação solar é uma fonte energética inesgotável e tem grande potencial de utilização a partir da captação e conversão da energia solar em outra forma de energia. No Brasil, devido aos altos níveis de irradiação solar no país, há grande potencial de geração de energia fotovoltaica.

Segundo o banco de dados de geração distribuída da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023), cerca de 99,8% da potência instalada no modelo de geração distribuída no Brasil em 2023 é proveniente de instalações fotovoltaicas, sendo cerca de mais de 686.000 novas conexões. Em relação as classes de consumo, apresentadas na Tabela 1, pode-se notar que o setor residencial é responsável pela maior parte desta potência instalada, com cerca de 46,4% do valor total, seguido pelo setor comercial com 28,8%.

Tabela 1 - Potência fotovoltaica instalada por classe de consumo em 2023.

Classe de consumo	Potência instalada (kW)
Comercial	2.410.939,03
Iluminação pública	721,07
Industrial	668.365,29
Poder público	110.370,84
Residencial	3.879.428,15
Rural	1.281.576,40
Serviço público	16.745,50
Total	8.368.146,28

Fonte: ANEEL (2023).

Outro fator que corrobora com a alta procura dos sistemas fotovoltaicos é a diminuição do valor da fatura de energia elétrica. Para os consumidores comerciais o valor do consumo de energia é bem mais elevado do que o de uma residência, devido aos diversos equipamentos que são instalados em um imóvel comercial. Sendo assim, o uso da geração fotovoltaica para esse tipo de estabelecimento é extremamente vantajoso para o consumidor, já que significa uma redução de gastos a longo prazo.

Devido ao crescimento do uso da energia fotovoltaica é possível encontrar diversos livros e trabalhos acadêmicos sobre o tema. Em Villalva (2015) são apresentados os conceitos básicos e de projeto de sistemas fotovoltaicos. O autor explora assuntos como o funcionamento das células fotovoltaicas, os sistemas de geração de energia solar assim como suas aplicações e tecnologias relacionadas.

Ainda, grande parte dos trabalhos acadêmicos envolvendo o tema energia fotovoltaica traz a aplicação desses sistemas em ambientes residenciais, tais como os de Bartelega (2015) e Tiba (2013). Em Bartelega (2015) é realizado um estudo de caso do consumo de energia elétrica uma residência na cidade de Guaratinguetá-SP, onde o autor apresenta possíveis soluções para redução no consumo e um plano para instalação de painéis fotovoltaicos. Em Tiba (2013) é apresentado o dimensionamento de um sistema fotovoltaico

residencial que funciona tanto como um sistema *on-grid* quanto *off-grid* utilizando um projeto próprio de controlador de carga.

Outros trabalhos acadêmicos que envolvem aplicações voltadas para instalações como escolas, comércios e indústrias trazem ênfase na viabilidade econômica da implementação desse tipo de sistema como em Sousa (2013), que faz uma análise do custo e retorno de investimento de um sistema fotovoltaico *off-grid* para alimentação da iluminação de lâmpadas LED no campus da UNESP de Guaratinguetá, e Alves (2017), com um estudo de caso de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico *on-grid* para uma empresa de refrigeração no município de Campo Mourão – PR.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo apresentar as principais etapas de dimensionamento de um sistema fotovoltaico para uma instalação comercial usando como base os dados de uma instalação real.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo apresentar as principais etapas de dimensionamento de um sistema fotovoltaico para uma instalação comercial e um estudo comparativo entre o dimensionamento de um sistema *on-grid* e *off-grid* utilizando como base os dados de uma instalação comercial real.

1.1.2 Objetivos específicos

- Dimensionar os sistemas fotovoltaicos *on-grid* e *off-grid*;
- Especificar os equipamentos elétricos e dispositivos de proteção utilizados na instalação, bem como o diagrama unifilar equivalente;
- Comparar os sistemas *on-grid* e *off-grid* quanto a sua viabilidade na aplicação proposta;
- Desenvolver uma planilha em Excel que sirva como referência para as etapas de projeto do sistema fotovoltaico.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

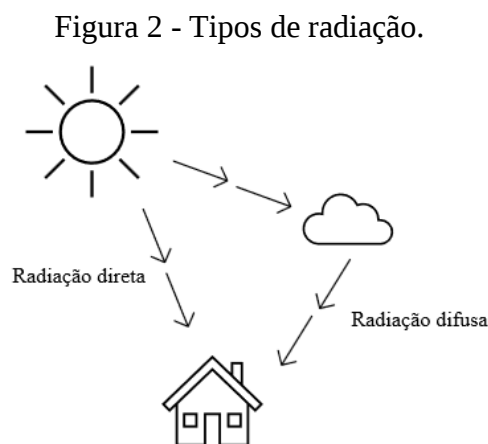
Este trabalho está organizado conforme a seguir. Na Seção 2 são apresentados os conceitos sobre a energia solar e os sistemas fotovoltaicos e seus componentes. Na seção 3 é desenvolvida a metodologia aplicada ao projeto. Na seção 4 são mostrados os resultados deste trabalho, sendo apresentado primeiramente o dimensionamento dos equipamentos elétricos e dispositivos de proteção do sistema *on-grid* e, em seguida, do sistema *off-grid*. Algumas comparações e discussões também serão discutidas na seção de resultados e discussões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ENERGIA SOLAR

A energia solar é a energia gerada pelas reações nucleares que ocorrem no Sol. Essa energia é transmitida para a Terra por meio de ondas eletromagnéticas denominadas de radiação solar. Por meio dessa radiação é possível fazer a captação da energia na forma de luz ou calor.

A radiação solar que atinge a superfície do planeta pode ser dividida entre a radiação direta, equivalente aos raios solares diretos do Sol que incidem em linha reta na superfície, e a radiação difusa, que corresponde aos raios solares que incidem indiretamente na superfície devido a desvios por difração e reflexão da luz (VAREJÃO-SILVA, 2006), como é mostrado na Figura 2. Essa radiação pode ser medida por meio de equipamentos compostos de sensores que realizam a conversão para a grandeza chamada de irradiância ou irradiação, dada em W/m^2 , que corresponde a potência da radiação solar incidente em uma determinada área.



Fonte: Produção do próprio autor.

Outra grandeza utilizada é a insolação, dada em Wh/m^2 , correspondendo a potência solar em uma determinada área ao decorrer de um determinado tempo. O Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio S. Brito (CRESESB), possui uma ferramenta que permite a consulta do valor da insolação diária média mensal em qualquer lugar do território brasileiro. A Figura 3 apresenta a ferramenta, onde o usuário deve inserir

as coordenadas geográficas do local e o sistema retorna com os valores de insolação coletados pelas estações de medições mais próximas do local.

Figura 3 - Ferramenta de consulta de insolação diária no território nacional.

Coordenada Geográfica

Latitude **Longitude**

Norte:

☒ graus decimais (00.00°)

☐ graus, minutos e segundos (00°00'00")

! Os valores válidos de latitude devem estar na faixa de 12° Norte e 40° Sul e de longitude na faixa de 30° Oeste e 80° Oeste.
Em caso de dúvida entre em contato conosco.

Localidades próximas

Latitude: 22,80291° S
Longitude: 45,191294° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m².dia]													Média	Delta			
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out			Nov	Dez	
☒	Guaratingueta	Guaratingueta	SP	BRASIL	22,801° S	45,149° O	4,3	5,56	5,79	4,91	4,48	3,68	3,41	3,55	4,51	4,67	5,15	5,24	5,87	4,73	2,45	
☒	Guaratingueta	Guaratingueta	SP	BRASIL	22,801° S	45,249° O		5,9	5,36	5,62	4,81	4,38	3,61	3,39	3,51	4,48	4,59	5,03	5,08	5,66	4,63	2,28
☒	Guaratingueta	Guaratingueta	SP	BRASIL	22,901° S	45,149° O		11,7	5,65	5,86	4,98	4,47	3,67	3,42	3,55	4,49	4,61	5,16	5,30	5,93	4,76	2,51

Fonte: CRESESB (2023).

Existem fatores que afetam a intensidade da radiação solar na Terra, e, consequentemente o quanto de aproveitamento da energia solar é possível obter a partir dela. De forma geral, a incidência dos raios solares depende do posicionamento do sol no céu, sendo assim um exemplo desses fatores é a inclinação do eixo de rotação do planeta, que deixa os hemisférios mais próximos ou mais afastados do sol ao decorrer do ano. A Figura 4 apresenta o posicionamento da Terra na órbita do Sol ao longo do ano.

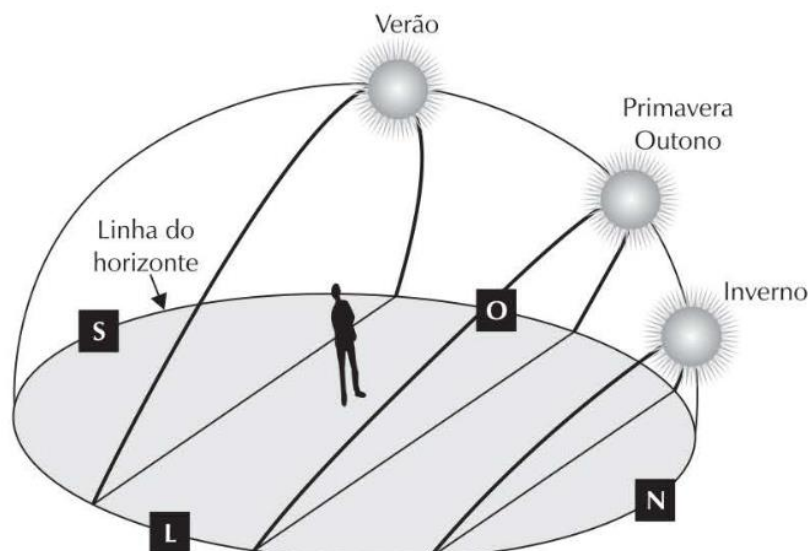
Figura 4 - Posição da Terra ao longo do ano.



Fonte: Villalva (2015).

O ângulo de declinação solar apresentado na Figura 4 é o ângulo dos raios solares em relação a linha do equador e é consequência da inclinação do eixo de rotação da terra. Em decorrência dessa angulação, o Sol apresenta uma trajetória diferente ao decorrer do ano, modificando a altura do Sol no céu, como é apresentado na Figura 5. Quanto maior é a altura solar menor é a influência da atmosfera sobre a radiação solar (VILLALVA, 2015). Sendo assim, a quantidade de radiação solar que chega na superfície para ser aproveitada depende principalmente da localização geográfica, estação do ano, horário do dia e condições climáticas.

Figura 5 - Altura solar ao longo do ano.



Fonte: Villalva (2015).

Assim, a conversão da energia solar em energia elétrica pode ser feita por meio de energia térmica, aproveitando o sol como fonte de calor para geração do vapor que move as turbinas acopladas aos geradores elétricos ou por meio da energia fotovoltaica (VILLALVA, 2015).

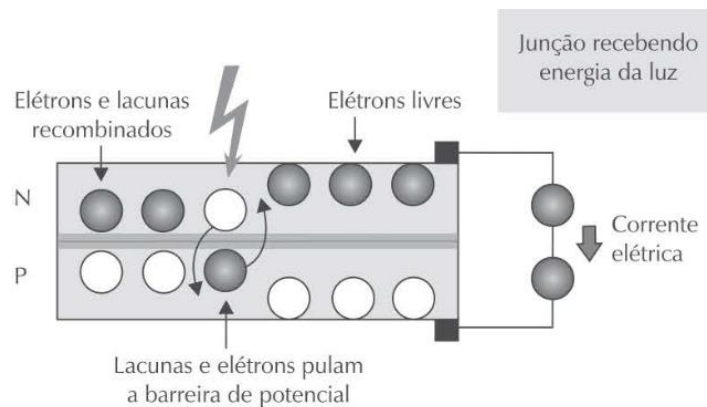
2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico que possibilita a conversão da luz do sol em eletricidade e é obtido a partir da incidência de radiação solar sobre uma célula feita de materiais semicondutores. Este efeito foi descoberto em 1839 com o físico Edmond Becquerel, que observou a ação da luz solar gerar uma tensão nos terminais de uma célula

eletroquímica (CEPEL-CRESESB, 2014). Os semicondutores, por sua vez, são elementos que possuem características intermediárias entre os materiais condutores e isolantes e são caracterizados por serem elementos fotocondutores (BOYLESTAD, 2012).

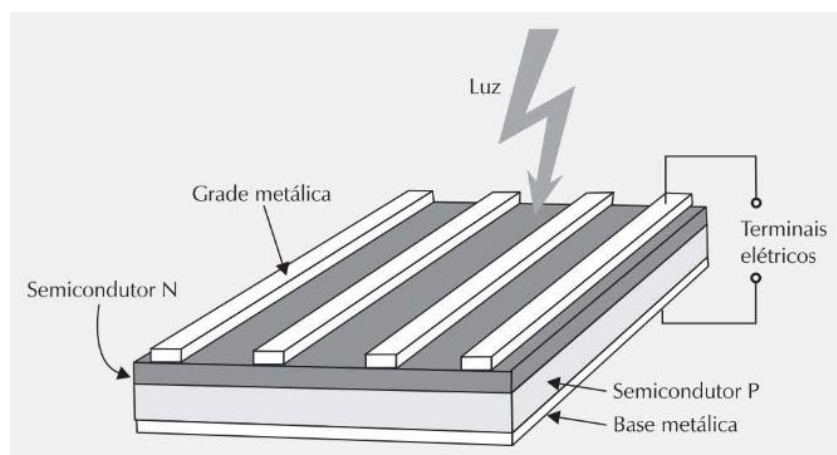
A Figura 6 apresenta uma junção PN que ao ser atingida pela luz solar faz com que o material semicondutor do tipo N passe a deslocar elétrons para o material do tipo P, gerando a corrente elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Este é o princípio básico de uma célula fotovoltaica, cuja estrutura pode ser vista na Figura 7. Além da junção PN, a célula fotovoltaica é composta por uma fina grade metálica na parte superior e uma base metálica na parte inferior que tem a função de gerar o contato elétrico para transmitir a corrente gerada até os terminais elétricos.

Figura 6 - Junção PN.



Fonte: Villalva (2015)

Figura 7 - Célula fotovoltaica.



Fonte: Villalva (2015)

2.2.1 Painéis fotovoltaicos

Os painéis ou módulos fotovoltaicos, apresentados conforme Figura 8, são equipamentos compostos por um conjunto de células fotovoltaicas conectadas em série de forma a fornecer maiores valores de tensão. Existem alguns tipos de painéis no mercado e eles são categorizados em relação as tecnologias das células fotovoltaicas utilizadas. Nesta seção serão descritos os tipos de células de compõe um painel fotovoltaico, a estrutura dos painéis assim como suas características técnicas e informações de instalação.

Figura 8 - Painéis fotovoltaicos.



Fonte: Critéria Energia Solar (2023)

2.2.1.1 Tipos de células fotovoltaicas

De acordo com o CEPEL-CRESESB (2014) as tecnologias de células fotovoltaicas comumente encontradas atualmente são as de silício monocristalino, silício policristalino e filmes finos. As células monocristalinas são as mais eficientes do mercado, porém são as de custo mais elevado também. Em seguida estão as policristalinas e as de filme fino, sendo a última a menos eficiente e com menor custo e complexidade de produção entre as três. A seguir serão descritos exemplos de cada uma destas tecnologias.

- **Silício monocristalino**

O silício, material semicondutor extraído a partir dos cristais de quartzo, é o material mais utilizado na fabricação de células fotovoltaicas. As células denominadas

células de silício monocristalino possuem esse nome pois são fabricadas a partir de um único cristal de silício puro, sendo este o principal motivo do seu alto custo. Em termos de eficiência, este tipo de célula pode alcançar entre 15 e 18% (Portal Solar, 2022).

Para a fabricação desse tipo de célula, o silício puro precisa passar por um processo chamado de método de Czochralski (VILLALVA, 2015), onde o material é submetido a um processo de cultura de cristais resultando em um lingote de silício monocristalino como é apresentado na Figura 9. A partir do lingote obtido são cortadas lâminas de espessura fina que irão passar pelo processo de dopagem para criação das camadas P e N e por fim recebem um acabamento com uma película antirreflexo e os respectivos contatos elétricos, resultando na aparência das células apresentadas na Figura 10.

Figura 9 - Processo de fabricação dos lingotes de silício monocristalino.



Fonte: Portal Solar (2022)

Figura 10 - Lâmina e célula fotovoltaica de silício monocristalino.



Fonte: Portal Solar (2022)

- **Silício policristalino**

As células de silício policristalino diferem das de silício monocristalino na fabricação do lingote de silício, que neste caso é obtido por meio de um processo mais simples e barato, onde o silício se cristaliza livremente resultando em um bloco sólido composto por vários cristais, como é mostrado na Figura 11. Apesar do menor custo, as células policristalinas alcançam eficiência menores que as cristalinas, entre 13% e 15% (Portal Solar, 2022). Devido ao tipo de fabricação e a criação dos múltiplos cristais, a célula policristalina apresenta algumas manchas em sua coloração, como é apresentado na Figura 12.

Figura 11 - Lingote de silício policristalino.



Fonte: Villalva (2015).

Figura 12 - Lâmina e célula fotovoltaica de silício policristalino.



Fonte: Portal Solar (2022)

- **Filme fino de plástico**

As células de filme fino são fabricadas por meio da deposição de finas camadas de material supercondutor em uma base que pode ser uma superfície rígida ou flexível. As principais características deste tipo de célula são o uso de pouca matéria prima e o menor consumo de energia, devido as menores temperaturas aplicadas no processo de fabricação.

As tecnologias empregadas neste tipo de célula são o silício amorfo (aSi), o silício microcristalino (μ Si), telureto de cádmio (CdTe) e CIGS (cobre-índio-gálio-selênio):

- Silício amorfo (aSi): Sendo a primeira tecnologia de filmes finos desenvolvida, as células de silício amorfo são fabricadas a partir do silano gasoso e o processo de dopagem do material também é feito com uso de gases. O material dopado é depositado na base, ou substrato, para criação das células. Apesar do baixo custo este tipo de célula possui baixa eficiência, cerca de 5% a 9% (PORTAL SOLAR, 2022).
- Silício microcristalino (μ Si): O processo de fabricação das células de silício microcristalino é dividido em duas etapas, uma em alta temperatura que confere características mais próximas das células cristalinas e outra em baixa temperatura onde a tecnologia de filmes finos é aplicada. Em termos de eficiência, este tipo de célula chega até 8,5% (VILLALVA, 2015).
- Telureto de cádmio (CdTe): Nessa tecnologia é utilizado como semicondutor o telureto de cádmio, o que torna a produção complicada devido ao cádmio ser um material tóxico, apresentando risco ambiental.

Disseleneto de cobre gálio e índio (CIGS): Fabricadas a partir de uma fina camada de disseleneto de cobre, índio e gálio essas células são mais eficientes entre as células de filme fino, entretanto a produção ainda não atinge larga escala devido ao alto custo (VILLALVA, 2015).

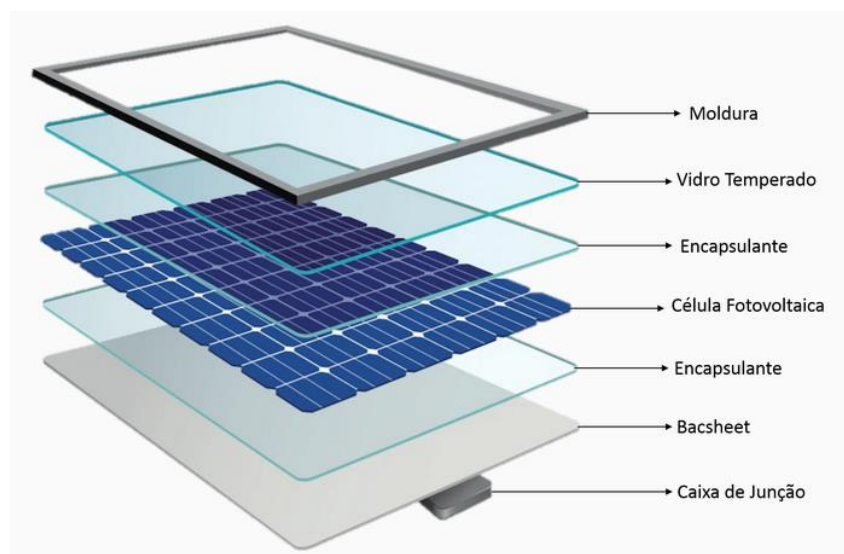
2.2.1.2 Estrutura

A estrutura de um painel fotovoltaico é apresentada na Figura 13. A caixa de junção é onde estão conectadas eletricamente as células fotovoltaicas e de onde são feitas as conexões do painel. O *backsheet* tem a função de proteger os componentes internos do painel. Os encapsulantes protegem as células fotovoltaicas dos desgastes causados pelos raios UV,

temperatura e umidade. A camada de vidro temperado tem a função de ajudar na absorção dos raios solares e o vidro é projetado para refletir o mínimo possível da luz solar. Por fim, a moldura de alumínio é utilizada para dar robustez ao painel.

O Portal Solar (2021) indica que a célula fotovoltaica representa 60% do custo de um painel fotovoltaico, em segundo lugar está o vidro com 10%; a caixa de junção representa 6% do valor enquanto o resto dos componentes tem um peso de 8% cada.

Figura 13 - Estrutura de um painel fotovoltaico.



Fonte: Minha Casa Solar (2019).

Os painéis fotovoltaicos podem ser conectados a outros painéis de forma a obter-se a geração de energia elétrica desejada e este agrupamento tem o nome de arranjo ou conjunto fotovoltaico. A lógica para o tipo de conexão entre os módulos segue o conceito básico de associação série e associação paralelo: módulos conectados em série geram maior valor de tensão, pois as tensões de cada módulo são somadas; módulos em paralelo tem maior valor de potência pois somam-se as correntes de cada módulo.

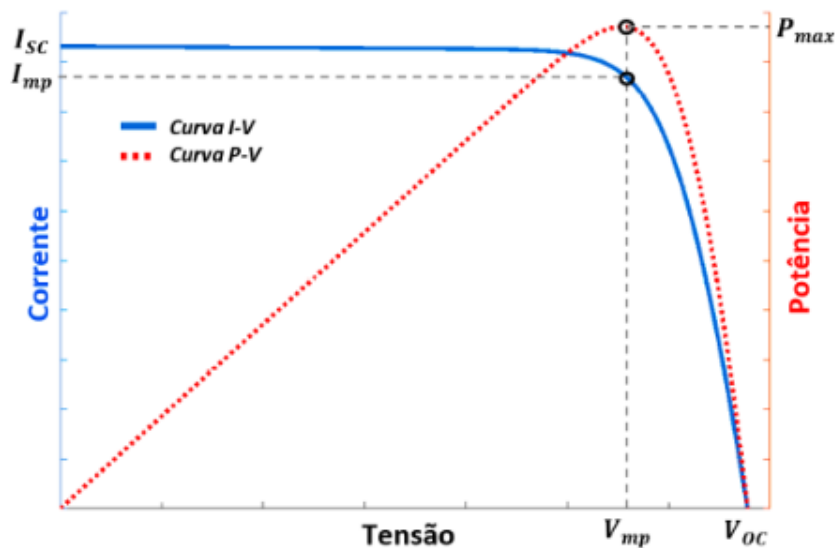
2.2.1.3 Especificações técnicas dos módulos

As informações e características dos módulos devem estar contidas na folha de dados técnicos do equipamento, conforme exemplo de um módulo fotovoltaico da marca CanadianSolar apresentado no Anexo A. Nela é possível encontrar todas as informações elétricas, como especificações e curvas características, assim como mecânicas e de temperatura.

- **Curvas características**

A tensão de saída de um módulo fotovoltaico não é constante e depende do valor de corrente que é demandada pela carga conectada em seus terminais. As relações de tensão e corrente e tensão e potência dos módulos seguem, respectivamente, as curvas I-V e P-V apresentadas na Figura 14. O ponto de máxima potência é o ponto de operação ideal dos módulos, onde o módulo fornece sua potência máxima e consequentemente a geração de energia é a maior possível.

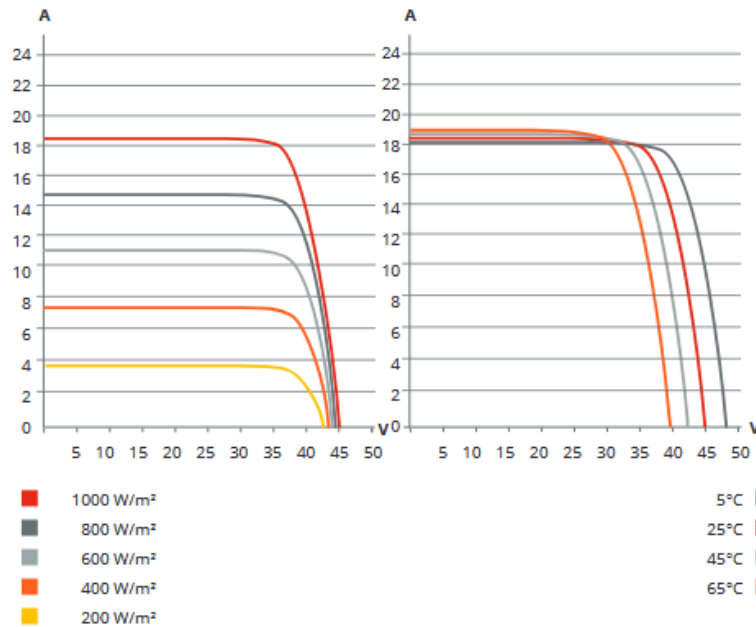
Figura 14 - Curvas características de um painel fotovoltaico.



Fonte: Araujo; Lopes; Moreira (2020).

Além da carga nos terminais do módulo, as relações de corrente, tensão e potência de saída podem ser afetadas também pela irradiação solar e temperatura na qual o módulo é exposto. A Figura 15 apresenta a curva característica I-V de um módulo fotovoltaico da marca CanadianSolar, nela pode ser visto que quanto maior a irradiação solar maior é o fornecimento de corrente pelo módulo; já o aumento de temperatura afeta a potência do módulo, pois diminui a tensão produzida nos seus terminais devido as características construtivas do painel.

Figura 15 - Relação de irradiância e temperatura com a geração de energia nos painéis fotovoltaicos.



Fonte: CanadianSolar (2024).

Um ponto importante a ser destacado é a diferença entre as características de *Standard Test Conditions* (STC) e de *Nominal Operating Cell Temperature* (NOTC), que são as características em relação as condições padrão de teste e em relação a temperatura normal de operação da células, respectivamente. As características NOTC são as mais próximas das características reais dos módulos (CEPEL-CRESESB, 2014).

- **Características em STC**

As características elétricas em STC são baseadas nas condições de teste com irradiação de 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C , produzidas em laboratório (VILLALVA, 2015). São elas:

- Tensão de circuito aberto (V_{OC}): é a tensão fornecida pelo módulo quando este se encontra com os terminais em aberto. Essa característica é importante pois equipamentos conectados ao modulo devem respeitar esse valor de tensão máxima.
- Corrente de curto-circuito (I_{SC}): é a corrente fornecida pelo módulo quando este se encontra com os terminais em curto-circuito. Esse valor representa a corrente máxima que o módulo pode fornecer.

- Tensão de máxima potência (V_{MP}): é a tensão fornecida pelo módulo quando este se encontra na condição de máxima potência.
- Corrente de máxima potência (I_{MP}): é a corrente fornecida pelo módulo quando este se encontra na condição de máxima potência.
- Máxima potência (P_{MP}): é a potência que o módulo fornece quando este se encontra na condição de máxima potência.
- Eficiência (η): é a eficiência de conversão do módulo definida pela organizações de certificação como o Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) no caso do Brasil.
- Resistência a corrente inversa: é o valor da corrente elétrica que o módulo suporta circulando no sentido da polaridade inversa nos terminais.
- **Características em NOTC**

As características elétricas em NOTC são baseadas em condições reais de operação do módulo com valor de irradiação de 800 W/m^2 e temperatura de $48,5^\circ\text{C}$. O valor de temperatura foi padronizado de acordo com a temperatura média de uma célula solar na temperatura ambiente de 20°C (VILLALVA, 2015).

As informações em NOTC encontradas nas folhas de dados são tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, tensão e corrente de máxima potência e máxima potência, seguindo os mesmos conceitos apresentados anteriormente para as características STC.

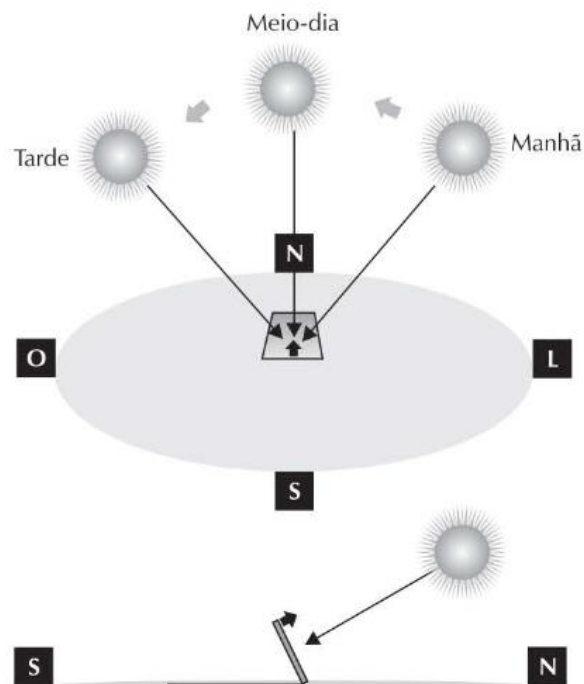
2.2.1.4 Instalação de painéis fotovoltaicos

Devido a variação do posicionamento do sol no céu, a instalação de painéis fotovoltaicos deve levar em conta alguns critérios e regras para que haja o melhor aproveitamento de luz solar.

- **Orientação dos módulos**

Conforme Villalva (2015), a orientação dos módulos deve estar voltada para o norte geográfico para que a produção de energia seja maximizada. O motivo é que se a face dos módulos estiver nessa direção há maior incidência dos raios solares sobre ele ao longo do dia, como é mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Orientação dos módulos voltados para o norte geográfico.



Fonte: Villalva (2015).

- **Inclinação dos módulos**

A incidência dos raios solares depende da posição do sol no céu, variando ao longo do dia e ano. Sendo assim, o ângulo de inclinação em que o módulo é instalado afeta o nível de produção de energia. Para o melhor aproveitamento do sol o ideal é variar esse ângulo durante o dia de acordo com o trajeto do sol. Em sistemas onde a inclinação dos módulos é fixa, é possível definir a melhor angulação a partir da latitude geográfica da localização dos painéis. A Tabela 2 apresenta a relação entre latitude geográfica do local da instalação e o ângulo de inclinação indicado para os painéis.

Tabela 2 - Relação entre latitude geográfica e ângulo de inclinação do módulo.

Latitude	Ângulo α
0° a 10°	10°
11° a 20°	Latitude
21° a 30°	latitude + 5°
31° a 40°	latitude + 10°
41° ou mais	latitude + 15°

Fonte: Villalva (2015).

Além da instalação fixa é possível instalar módulos com rastreamento automático do sol. Essa é uma opção mais cara já que necessita de partes mecânicas móveis e um sistema de controle.

- **Espaçamento dos módulos**

Em sistemas com um número maior de módulos que precisam ser enfileirados é necessário levar em consideração a sombra que os módulos de uma fileira podem causar na fileira seguinte. Para minimizar o sombreamento dos módulos é necessário fazer a instalação das fileiras com um determinado distanciamento D entre elas, como mostra a Figura 17.

Figura 17 - Espaçamento entre módulos.



Fonte: Villalva (2015).

Em conformidade com Villalva (2015), para definir o distanciamento dos módulos deve-se escolher a melhor estratégia entre maximizar a eficiência do sistema utilizando a equação (1) ou maximizar o aproveitamento do espaço livre para instalação baseando-se na equação (2).

$$d = 3,5 \times z \quad (1)$$

Sendo:

d : distância entre as fileiras de módulos;

z : altura da haste de fixação do módulo.

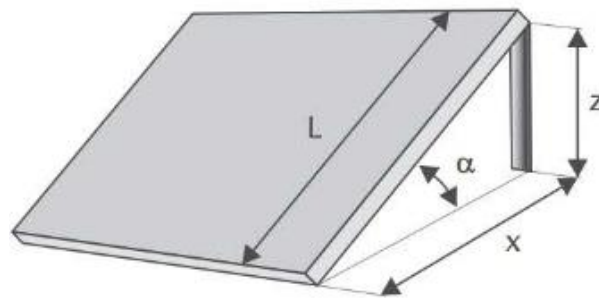
$$d = 2,25 \times L \quad (2)$$

Sendo:

d: distância entre as fileiras de módulos;
 L: comprimento do módulo.

As dimensões de comprimento do módulo L e distância da haste de fixação z são representadas na Figura 18.

Figura 18 - Dimensões da instalação dos módulos.



Fonte: Villalva (2015).

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos são sistemas de geração de energia compostos por uma estrutura desde a geração até o consumo da energia. Esses sistemas são divididos em dois tipos principais: os sistemas *off-grid* e os sistemas *on-grid*. Ambos utilizam painéis fotovoltaicos como fonte de geração de energia, porém a diferença entre eles é que no sistema *on-grid* existe conexão elétrica entre a saída do inversor e a rede elétrica de distribuição de energia, enquanto no sistema *off-grid* não existe conexão com a rede elétrica. Em sistemas *off-grid* toda energia gerada pelos painéis é armazenada em bancos de baterias.

2.3.1 Sistemas *off-grid*

Os sistemas fotovoltaicos *off-grid*, representado na Figura 19, também chamados de sistemas autônomos, são sistemas de geração de energia fotovoltaica cuja instalação é independente da rede de distribuição de energia elétrica.

Figura 19 - Componentes dos sistemas fotovoltaicos autônomos.



Com base na Figura 19, os equipamentos que compõem um sistema *off-grid* são: painéis fotovoltaicos, banco de baterias, controlador de carga e inversor. O controlador de carga recebe a corrente contínua gerada pelos painéis fotovoltaicos e faz a distribuição dessa carga entre o carregamento das baterias e o inversor, que converte a corrente contínua em corrente alternada para a alimentação da instalação. Durante os períodos em que os painéis não estão produzindo energia, o controlador de carga faz com que as baterias passem a fornecer a energia para o inversor.

De acordo com Villalva (2015), os módulos do sistema *off-grid* geralmente são ligados em paralelo, pois operam com baixa tensão, mas, para aumentar a potência do sistema, pode-se ligar conjuntos de módulos em série em paralelo. Sendo assim, os módulos em série determinam a tensão do conjunto e a ligação em paralelo define a potência. O controlador de carga deve suportar corrente máxima do conjunto de módulos.

Devido a sua independência em relação a rede os sistemas autônomos são capazes de levar energia elétrica para locais onde a rede de distribuição não chega, além disso, ele torna o consumidor isento dos encargos advindos das concessionárias de energia elétrica. Entretanto, é um tipo de sistema que, dependendo da aplicação e tamanho, pode se tornar um investimento mais caro e que requer maior espaço para instalação.

2.3.1.1 Componentes do sistema *off-grid*

Os principais componentes de um sistema *off-grid* que consistem em: baterias, controlador de carga e inversor são descritos como:

- **Baterias**

As baterias utilizadas nos sistemas fotovoltaicos autônomos têm a função de prover o fornecimento de energia elétrica de forma constante para a instalação. Com isso, a energia gerada pelos painéis é armazenada nas baterias e pode ser usada durante a noite, por exemplo.

Assim como os painéis, as baterias podem ser agrupadas em série ou paralelo, formando um banco de baterias. Os níveis de tensão de operação comumente utilizados são 12, 24 e 48V.

Segundo Villalva (2015), nos sistemas fotovoltaicos devem ser aplicadas somente as baterias do tipo estacionárias, projetadas para aplicações que necessitam do fornecimento constante de corrente elétrica e que podem ser descarregadas diversas vezes enquanto as baterias comuns, como as baterias automotivas, são projetadas para fornecer um alto valor de corrente durante um curto período de tempo e não suportam um descarregamento total.

O tipo de bateria mais utilizado é a de chumbo ácido, apresentada na Figura 20, podendo ser de eletrólito líquido ou em gel. A principal diferença entre elas é que com as de eletrólito líquido há necessidade maior de manutenção, porém possuem um custo reduzido. Já as de eletrólito em gel são mais seguras, não há risco de vazamentos e possuem uma vida útil maior. Outros tipos de baterias podem ser utilizados como as baterias de níquel-cádmio e níquel-metal-hidreto, que são mais caras, porém suportam descargas maiores.

Figura 20 - Bateria estacionária de chumbo ácido.



Fonte: Moura Solar (2024).

Os parâmetros importantes para as baterias em um sistema fotovoltaico são capacidade nominal, tensão nominal e profundidade de descarga.

- Capacidade nominal: A capacidade nominal C de uma bateria é fornecida em Ampere hora (Ah) e indica o valor de corrente elétrica I que a bateria fornece no tempo, dependendo de sua taxa de descarga Δt , conforme equação (3).

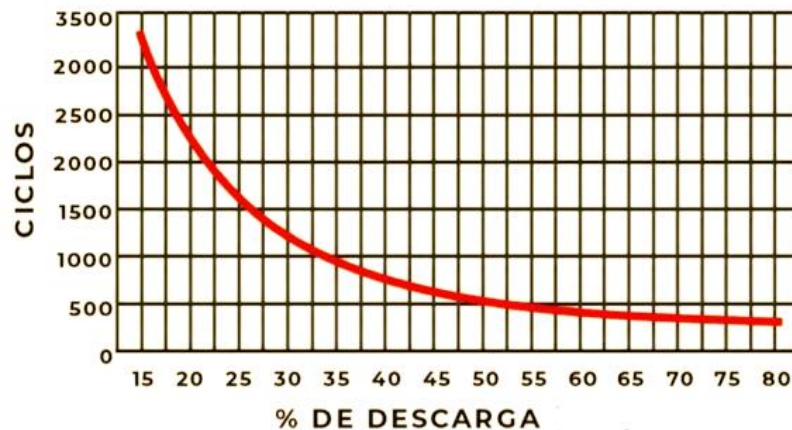
$$C = I \times \Delta t \quad (3)$$

Por exemplo, uma bateria de 240 Ah com uma taxa de descarga de 100h é capaz de fornecer uma corrente de 2,4 A. Ainda, se a mesma bateria fosse descarregada em 10h ela seria capaz de fornecer 24 A durante 10h.

- Tensão nominal: A tensão nominal de uma bateria é o valor de tensão padrão que ela fornece durante sua operação.
- Profundidade de descarga: Profundidade de descarga é um percentual que identifica o quanto uma bateria irá ser descarregada no processo de descarga. Existe uma relação de custo e duração da vida útil das baterias na definição do valor da profundidade de descarga: quanto menor for a profundidade de descarga maior a durabilidade da bateria, porém maior será o custo do sistema (VILLALVA, 2015). Do mesmo modo, para um valor maior de profundidade tem-se um custo e durabilidade menores. A Figura 21 apresenta um gráfico da profundidade de descarga de uma bateria em relação ao número de ciclos de uso, sendo possível observar que

ao aumentar a profundidade de descarga da bateria o número de ciclos de carga e descarga que ela consegue realizar, ou seja, sua vida útil, é menor.

Figura 21 - Ciclos de uso de uma bateria em função da profundidade de descarga.



Fonte: Solar Brasil (2021).

- **Controlador de carga**

Os controladores de carga possuem a função de proteger a bateria contra cargas e descargas excessivas, visando o aumento da vida útil do equipamento (CEPEL-CRESESB, 2014). Segundo Villalva (2015), o controlador monitora o carregamento da bateria, impedindo que continue a ser carregada quando atinge a tensão de operação; na descarga o controlador interrompe o consumo quando a bateria atinge um nível crítico.

Existem três tipos de tecnologias que caracterizam os controladores de carga. A primeira delas são os controladores convencionais, cuja única função é realizar a conexão e desconexão dos módulos fotovoltaicos ou do consumidor de acordo com o nível de carregamento do banco de baterias; esse tipo de controlador possui chaves eletrônicas e um circuito de controle para monitorar a tensão do banco de baterias, assim, quando as baterias estão completamente carregadas, os módulos fotovoltaicos são desconectados do sistema, sendo conectados novamente quando a tensão das baterias cai para um valor definido e o mesmo vale para o consumidor, que é desconectado do sistema quando as baterias estão próximas de atingirem a descarga completa e reconectado quando a carga é reestabelecida.

O segundo tipo é o controlador com PWM, cujo funcionamento é similar ao convencional, porém o chaveamento é realizado por meio de um controlador PWM que otimiza o processo de carregamento das baterias.

O último tipo é o controlador com MPPT, apresentado na Figura 22, sendo este o mais sofisticado e vantajoso entre eles pois possui uma tecnologia de rastreamento do ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos; o funcionamento deste controlador conta com um circuito eletrônico que desacopla os módulos fotovoltaicos do banco de baterias, permitindo que operem em valores diferentes de tensão (VILLALVA, 2015). O controlador MPPT faz o monitoramento da tensão e corrente nos módulos e por meio de algoritmos faz o ajuste da tensão para que o painel opere na tensão que resulta no ponto de operação de máxima potência que obedece a curva P-V dos módulos fotovoltaicos.

Figura 22 - Controlador de carga com MPPT.



Fonte: EPEVER (2024).

As principais especificações dos controladores de carga são tensão nominal, tipo de bateria, corrente de carga, potência de carga e tensão máxima de circuito aberto.

- Tensão nominal: A tensão nominal de um controlador de carga é o valor de tensão padrão para qual o equipamento foi projetado para operar. O valor da tensão nominal do controlador deve ser equivalente a tensão de operação do sistema fotovoltaico.
- Tipo de bateria: O controlador de carga deve ser compatível com o tipo de bateria utilizada no sistema.
- Corrente de carga: A corrente de carga do controlador é o valor máximo de corrente que o controlador é capaz de suportar. Dessa forma, este valor deve ser compatível com o valor de corrente máximo produzido pelo sistema.

- **Potência de carga:** A potência de carga do controlador é o valor máximo de potência que o controlador é capaz de suportar. Dessa forma, este valor deve ser compatível com o valor máximo de potência gerado pelo sistema.
- **Tensão máxima de circuito aberto:** A tensão máxima de circuito aberto de um controlador de carga diz respeito ao valor máximo de tensão de entrada suportado pelo equipamento. Para o funcionamento do sistema o valor dessa tensão deve ser equivalente ao valor de tensão de circuito aberto do arranjo de painéis fotovoltaicos.
- **Inversor**

A corrente gerada pelos painéis fotovoltaicos é uma corrente contínua portanto, dependendo da aplicação, faz-se necessário a conversão do sinal em corrente contínua (CC) para um sinal de corrente alternada (CA). O inversor, apresentado na Figura 23, é o equipamento responsável por essa conversão.

Figura 23 - Inversor *off-grid*.

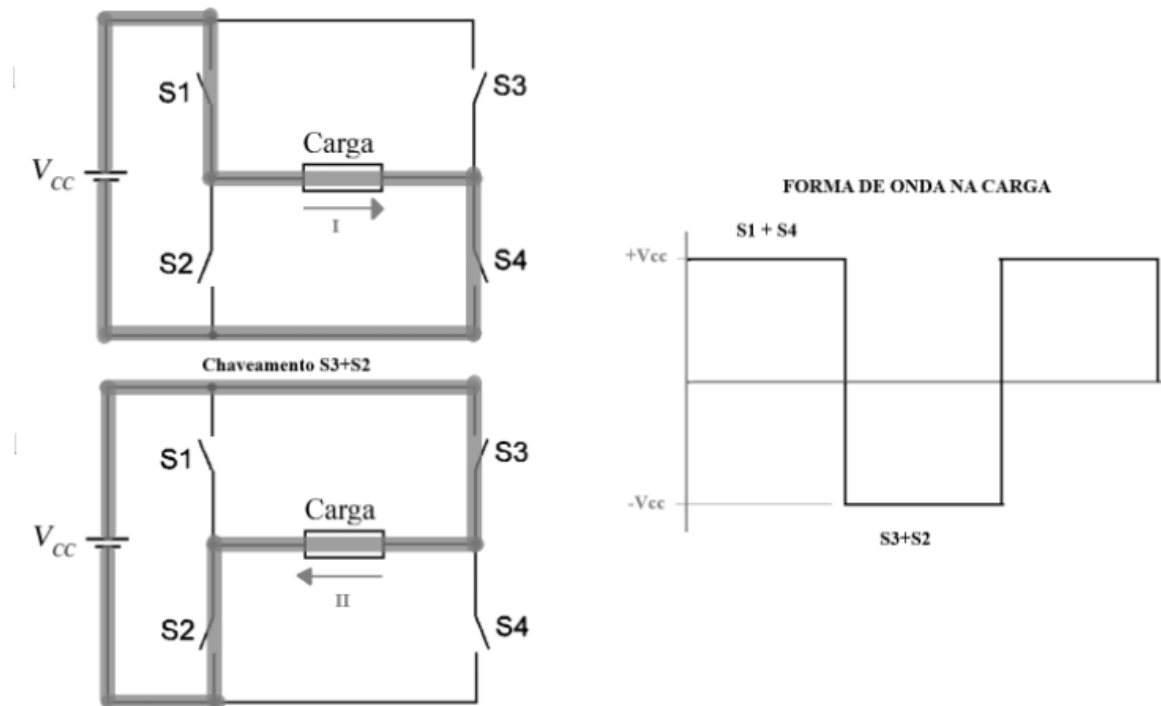


Fonte: EPEVER (2024).

O princípio de funcionamento dos inversores CC/CA é baseado no uso de chaves eletrônicas como é mostrado na Figura 22. Em um primeiro momento as chaves S1 e S4 são ligadas e a corrente passa pela carga no sentido I, resultando em uma tensão V_{cc} positiva na carga. Quando as chaves S1 e S4 são desligadas e as chaves S3 e S4 ligadas, a corrente passa a circular no sentido oposto, resultando em uma tensão V_{cc} negativa na carga. Realizando esse chaveamento em uma determinada frequência, a forma de onda de tensão obtida na carga é uma onda alternada quadrada, como é apresentado na Figura 24. Este tipo de circuito é

conhecido como inversor de onda quadrada, e seu uso mais comum é para alimentação de cargas resistivas, como pequenos fornos resistivos e lâmpadas incandescentes.

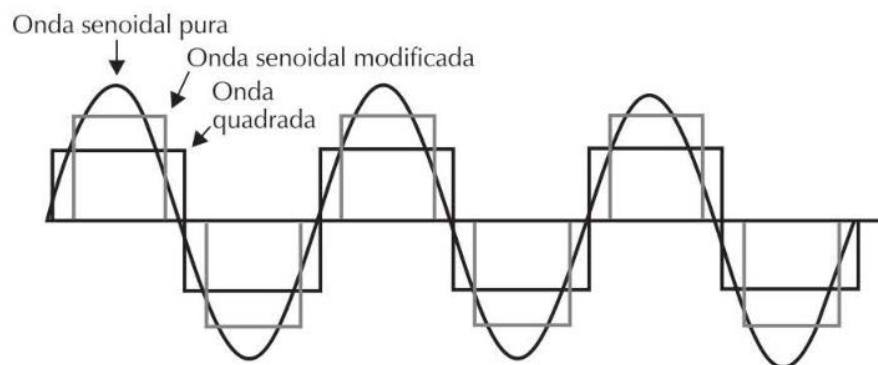
Figura 24 - Circuito básico de funcionamento dos inversores.



Fonte: CEPEL-CRESESB (2014)

Para aplicações práticas, existem tecnologias que são aplicadas nos inversores e que resultam em sinais com ondas mais próximas as ondas senoidais. Nesta categoria, encontram-se os inversores de onda senoidal modificada e inversores de onda senoidal pura, cujos formatos de onda são apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Formas de onda dos inversores.



Fonte: Villalva (2015).

Os inversores de onda senoidal pura utilizam o princípio da modulação de largura de pulso, gerando um sinal de onda quadrada em alta frequência de onde é obtido um sinal senoidal fundamental a partir da utilização de um filtro elétrico. Esse tipo de inversor tem custo mais elevado, porém seu uso é destinado a aplicações que requerem maior confiabilidade e qualidade, já que com este tipo de modulação o sinal na saída do inversor possui baixa distorção harmônica e não prejudica equipamentos que são sensíveis as distorções, ao contrário dos inversores com onda quadrada.

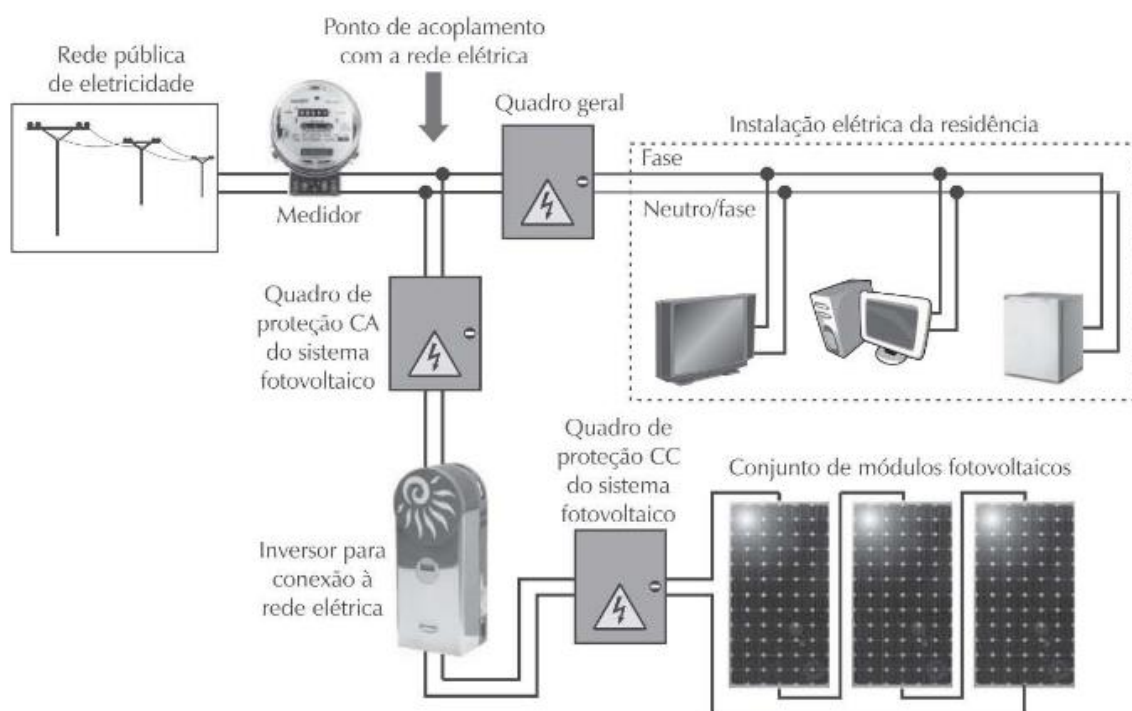
As principais especificações dos inversores de frequência utilizados nos sistemas fotovoltaicos *off-grid* são tensão de entrada CC, tensão de saída CA, potência nominal, potência máxima e forma de onda de saída.

- Tensão de entrada CC: A tensão de entrada CC de um inversor é o valor de tensão nominal na entrada do equipamento e deve ser equivalente a tensão de operação do sistema.
- Tensão de saída CA: A tensão de saída CA de um inversor é o valor de tensão em corrente alternada fornecida pelo equipamento nos seus terminais de saída podendo ser 110 V ou 220 V, dependendo do nível de tensão da rede de distribuição de energia elétrica.
- Potência nominal: A potência nominal de um inversor é o valor de potência que o equipamento fornece para a carga alimentada por ele.
- Potência máxima: A potência máxima de um inversor é o valor de potência superior a potência nominal que o equipamento pode fornecer em casos de sobrecarga no sistema.
- Forma de onda de saída: A forma de onda de saída do inversor está relacionada ao tipo de sinal fornecido na saída do equipamento, que pode ser um sinal de onda quadrada, onda senoidal pura ou onda senoidal modificada, dependendo da tecnologia utilizada na conversão do sinal. Os inversores de onda senoidal pura são os mais indicados pois reproduzem um sinal mais semelhante ao sinal senoidal da rede elétrica.

2.3.2 Sistemas *on-grid*

Os sistemas fotovoltaicos *on-grid*, representados na Figura 26, são sistemas de geração de energia fotovoltaica caracterizados por sua conexão com a rede de distribuição de energia elétrica, portanto seu funcionamento é dependente da rede elétrica.

Figura 26 - Componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.



Fonte: Villava (2015)

O sistema *on-grid* funciona com o inversor transformando a eletricidade de corrente contínua gerada pelos painéis fotovoltaicos em corrente alternada, que é inserida na rede. A saída do inversor é conectada a um medidor bidirecional, apresentado na Figura 27; este equipamento faz a leitura do que é injetado na rede pelo sistema e do que é consumido da rede. Dessa forma, o valor da fatura de energia elétrica que o consumidor irá pagar é a diferença entre essas duas leituras. Entretanto, a Resolução 1000/2021 da ANEEL impõe uma taxa mínima de custo de disponibilidade do sistema elétrico, que depende do tipo da instalação (monofásica, bifásica ou trifásica), sendo assim existe um valor mínimo que o consumidor deve pagar, mesmo que o consumo resultante da instalação seja menor que o valor imposto.

Figura 27 - Medidor bidirecional (monofásico).



Fonte: Eletra (2024).

Conforme indicado por Villalva (2015), os módulos do sistema *on-grid* geralmente são ligados em série, pois operam com tensões elevadas, mas, para aumentar a potência do sistema, pode-se ligar conjuntos de módulos em série em paralelo. Sendo assim, os módulos em série determinam a tensão do conjunto e a ligação em paralelo define a potência. Os inversores devem suportar tanto a tensão de circuito aberto do conjunto quanto a potência total.

Os sistemas de geração *on-grid* só funcionam quando conectados à rede elétrica portanto uma das principais desvantagens é que em caso de algum problema com o fornecimento de energia pela concessionária o sistema fotovoltaico não irá fornecer energia para a instalação. Por outro lado, se por algum motivo os painéis deixam produzir energia, o consumidor ainda conta com a eletricidade fornecida pela rede.

2.3.2.1 Componentes do sistema *on-grid*

Os principais componentes de um sistema *on-grid* que consistem em: módulos e inversor são descritos como:

- **Inversor**

Assim como nos sistemas *off-grid*, o inversor aplicado no sistema *on-grid*, apresentado na Figura 28, é o responsável por fazer a conversão CC/CA da corrente gerada

pelos painéis fotovoltaicos. A diferença entre os dois tipos de inversores é o tipo de grandeza que o equipamento fornece para o sistema. Enquanto o inversor *off-grid* fornece uma tensão alternada em seus terminais, o inversor *on-grid* funciona como uma fonte de corrente, ou seja, ele fornece apenas corrente elétrica e não tem capacidade de prover tensão elétrica (VILLALVA, 2015). Apesar de ter uma estrutura e funcionamento parecido com o que foi apresentado na Figura 24, o inversor *on-grid* possuiu um circuito eletrônico que transforma a tensão alternada obtida no chaveamento em corrente alternada.

Figura 28 - Inversor *on-grid*.



Fonte: Fronius (2023).

Vale ressaltar que a tecnologia MPPT citada nos controladores de carga também é aplicada para os inversores. De acordo com Villalva (2015) todos os inversores *on-grid* possuem essa tecnologia. Para atingir o ponto de máxima potência dos módulos, o inversor altera o valor da tensão na saída dos módulos, para baixo e para cima, até encontrar a estabilidade no valor de potência gerado.

As principais especificações dos inversores de frequência utilizados nos sistemas fotovoltaicos *on-grid* são faixa útil de tensão CC na entrada, tensão CC máxima na entrada, número máximo de *strings* na entrada, número de entradas MPPT, tensão de operação CA, potência CC de entrada e potência CA de saída.

- Faixa útil de tensão CC: A faixa de tensão CC na entrada do inversor é a faixa de tensão em que o inversor consegue operar e tem a maximização de energia pelo sistema MPPT.

- Tensão CC máxima: A tensão CC máxima na entrada do inversor é o valor máximo de tensão contínua que o equipamento suporta na operação.
- Número máximo de *strings*: *String* é o nome dado a um conjunto de módulos que estão conectados por meio de uma associação série. Os inversores possuem um número de entradas limitadas para as *strings* do sistema.
- Número de entradas MPPT: Os inversores *on-grid* possuem um ou mais sistemas MPPT para maximização da potência dos conjuntos de *string* conectados ao equipamento. Para inversores com múltiplas entradas MPPT isso significa que para um determinado número de *strings* existe um sistema independente de rastreamento.
- Tensão de operação CA: A tensão de operação CA de um inversor é o valor de tensão alternada na qual o equipamento opera. O valor da tensão de operação do inversor deve ser equivalente ao nível de tensão na rede elétrica na qual ele será conectado.
- Potência CC: A potência CC de um inversor é o valor de potência de corrente contínua que pode ser ligado na entrada do equipamento. O valor da potência CC do inversor deve estar de acordo com o valor da potência dos módulos fotovoltaicos conectados a ele.
- Potência CA: A potência CA de um inversor é o valor de potência de corrente alternada que o equipamento é capaz de fornecer para a rede elétrica.

2.4 NORMAS E REGULAMENTAÇÕES APLICÁVEIS

A Norma Técnica Brasileira (NBR) 16690, criada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabelece os requisitos mínimos para projeto e instalação de sistemas fotovoltaicos. Nela estão indicadas as diversas normas que devem ser consultadas em paralelo tais como: ABNT NBR 5410 sobre as instalações elétricas de baixa tensão, ABNT NBR 5419 sobre requisitos e documentação para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, ABNT NBR 16612 sobre cabeamento fotovoltaico, entre outras.

Além das normas citadas deve ser consultada as Resoluções 1000/2021 e 1059/2023 da ANEEL, que definem as condições para conexão dos sistemas fotovoltaicos a rede elétrica. Na seção 4 serão descritos com mais detalhes os itens de cada norma utilizados neste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho baseia-se em um estudo prévio do local, formado pela caracterização, tanto física como em termos de consumo de energia, da instalação. O local foi analisado de forma a obter uma relação de equipamentos utilizados e dimensionamento do espaço disponível. A partir das informações adquiridas é esperado realizar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico específico para as necessidades do estabelecimento em questão utilizando como base no método da insolação apresentado por Villalva (2015).

3.1 LOCALIZAÇÃO E ÁREA LIVRE PARA INSTALAÇÃO

O ponto comercial em estudo fica localizado na cidade de Guaratinguetá, São Paulo. É um imóvel pequeno, grande parte da área interna é ocupada pelos equipamentos e móveis, porém possui um telhado plano de 7,5mx5m, apresentado na Figura 29, resultando em cerca de 37,5m² de área livre.

Figura 29 - Telhado da instalação.



Fonte: Google Earth (2023).

3.2 POTÊNCIA INSTALADA

O comércio em questão trata-se de uma casa de bolos onde são vendidos bolos, doces e salgados, tanto para consumo no local quanto para retirada, e, portanto, possui equipamentos de refrigeração e aquecimento. Uma listagem de todos os equipamentos, com suas respectivas quantidades e potência, é apresentada na Tabela 3. A potência total instalada da instalação é 1.036 W.

Tabela 3 - Potência instalada no ponto comercial.

Equipamento	Quantidade	Potência unitária (W)	Potência do conjunto (W)
Geladeira	2	155	310
Freezer	1	250	250
Balcão refrigerado	1	240	240
Estufa aquecida	1	200	200
Iluminação (lâmpadas)	3	12	36
POTÊNCIA TOTAL (W)		1.036	

Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Geralmente ao se fazer um estudo de consumo de energia de uma instalação utiliza-se como base o consumo dentro do período de um ano ou mais, entretanto, o ponto comercial estudado está em funcionamento há menos de um ano e meio e a potência instalada foi sendo acrescentada ao longo deste tempo, portanto comparando algumas faturas de energia elétrica pode-se ver que o consumo teve um aumento nos últimos seis meses de funcionamento. Dessa forma, para não subdimensionar a instalação, foram considerados apenas seis meses (janeiro-junho) para o estudo. A relação mês-consumo da instalação é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Relação do consumo mensal da instalação.

Mês/ano	Consumo (kWh)
Maio/22	57,0
Julho/22	177,0
Agosto/22	208,0
Setembro/22	203,0
Outubro/22	199,0
Novembro/22	238,0
Dezembro/22	330,0
Janeiro/23	338,0
Fevereiro/23	321,0
Março/23	375,0
Abril/23	411,0
Maio/23	428,0
Junho/23	366,0
Média (janeiro-junho)	373,2

Fonte: Produção do próprio autor.

Portanto, a média de consumo da instalação é de aproximadamente 373 kWh. De forma a se ter uma instalação bem dimensionada, para este projeto será considerado um consumo mensal de 400 kWh.

3.4 IRRADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO

A partir das coordenadas da instalação (22°46'52.0"S 45°10'52.0"W) e com o auxílio do programa *SunData*, ferramenta disponibilizada pelo CRESESB, é possível obter a insolação solar diária média durante os meses do ano. A Figura 30 apresenta o resultado da ferramenta para as coordenadas citadas.

Figura 30 - Irradiação solar diária média na região da instalação.

Localidades próximas															
Latitude: 22,780556° S Longitude: 45,181667° O															
#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m².dia]										
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
✓	Guaratingueta	Guaratingueta	SP	BRASIL	22,801° S	45,149° O	4,1	5,56	5,79	4,91	4,48	3,68	3,41	3,55	4,51
✓	Guaratingueta	Guaratingueta	SP	BRASIL	22,801° S	45,249° O	7,3	5,36	5,62	4,81	4,38	3,61	3,39	3,51	4,48
✓	Lorena	Lorena	SP	BRASIL	22,701° S	45,149° O	9,5	5,34	5,61	4,77	4,34	3,63	3,41	3,54	4,49
								Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta		
								4,67	5,15	5,24	5,87	4,73	2,45		
								4,59	5,03	5,08	5,66	4,63	2,28		
								4,98	4,99	5,59	4,60	2,20			

Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidades próximas

Fonte: CRESESB (2018)

Nos projetos de sistemas fotovoltaicos é de bom tom considerar o menor valor de irradiação solar no decorrer do ano pois assim tem-se a garantia de que o sistema irá suprir

a demanda de energia mesmo nos meses com menor incidência solar (VILLALVA, 2015). Desta forma, para esse projeto foi considerado um valor de insolação diária de 3,41 kWh/m².dia, sendo este obtido no mês de junho para a estação mais próxima do ponto de referência.

3.5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

O dimensionamento do sistema fotovoltaico será feito com base nas informações e considerações apresentadas nos itens anteriores para a instalação em estudo. A análise do espaço livre é necessária para definir a viabilidade física da instalação dos módulos, assim como o restante dos equipamentos.

Ainda, o levantamento do consumo de energia elétrica e da potência instalada, assim como o estudo da irradiação solar incidente, é de extrema importância para o dimensionamento do sistema pois são principais parâmetros para a definição da dimensão e capacidade do sistema que será projetado.

Sendo assim, neste trabalho serão apresentados os resultados obtidos para o dimensionamento de dois sistemas fotovoltaicos, sistema *on-grid* e *off-grid*. Para isso serão dimensionados os equipamentos que compõe a estrutura de cada um dos sistemas e os dispositivos de proteção necessários.

Por fim, pretende-se comparar os aspectos de projeto de ambos os sistemas e disponibilizar uma planilha de cálculos desenvolvida com o intuito de facilitar o dimensionamento dos equipamentos neste tipo de projeto.

3.5.1 Equações aplicáveis

A seguir são descritas as principais equações fornecidas por Villava (2015) utilizadas no dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos que serão apresentados durante a seção 4.

Para dimensionar o número de módulos do sistema, tanto *on-grid* como *off-grid*, é utilizada a equação (3) e em sequência a equação (4).

$$E_P = E_S \times A_M \times \eta_M \quad (3)$$

Sendo:

E_P : energia produzida pelo módulo diariamente [Wh];

E_S : irradiação solar diária média [Wh/m².dia];

A_M : área do módulo [m²];

η_M : rendimento do módulo.

$$N_M = \frac{E_C}{E_P} \quad (4)$$

Sendo:

N_M : número de módulos;

E_C : energia média consumida na instalação por dia [Wh];

Para dimensionar o banco de baterias do sistema *off-grid*, o primeiro passo é obter o valor da energia que deve ser armazenada nas baterias. Este valor é obtido por meio da equação (5).

$$E_A = \frac{E_C \times n_{dias}}{P_D} \quad (5)$$

Sendo:

E_A : energia armazenada nas baterias [Wh];

n_{dias} : número de dias de energia armazenada;

P_D : profundidade de descarga da bateria [%].

Em seguida, é definido o número de baterias em série pela equação (6), a capacidade do banco pela equação (7) e por fim o número de baterias em paralelo pela equação (8).

$$N_{BS} = \frac{V_{BANCO}}{V_{BAT}} \quad (6)$$

Sendo:

N_{BS} : número de baterias ligadas em série;

V_{BANCO} : tensão de operação do banco de baterias;

V_{BAT} : tensão nominal da bateria.

$$C_{BANCO} = \frac{E_A}{V_{BANCO}} \quad (7)$$

Sendo:

C_{BANCO} : capacidade do banco de baterias [Ah];

$$N_{BP} = \frac{C_{BANCO}}{C_{BAT}} \quad (8)$$

Sendo:

N_{BP} : número de baterias ligadas em paralelo;

C_{BAT} : capacidade da bateria [Ah].

As demais considerações para a especificação do restante dos componentes dos sistemas *on-grid* e *off-grid* serão apresentadas nas seções 4.1 e 4.2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento deste trabalho foi feito com base no método da insolação apresentado por Villalva (2015), que utiliza o valor de insolação diária média da localização para o cálculo da produção de energia de um módulo fotovoltaico previamente escolhido. Na seção 4.1 é apresentado o dimensionamento de um sistema *off-grid* e na seção 4.2 é apresentado o dimensionamento de um sistema *on-grid*. Além do dimensionamento de ambos os sistemas e seus dispositivos de proteção, na seção 4.3 é feita uma breve descrição da planilha de cálculo desenvolvida neste trabalho para auxiliar a etapa de projeto do sistema fotovoltaico.

4.1 DIMENSIONAMENTO *OFF-GRID*

O primeiro passo no dimensionamento de um sistema fotovoltaico *off-grid* é a definição do módulo fotovoltaico a ser utilizado. O modelo escolhido para o projeto foi o CS6W-540MS da CanadianSolar. As especificações técnicas do módulo, baseado na folha de dados do fabricante, são apresentadas na Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 - Especificações técnicas elétricas módulo CS6W-540MS.

Especificação elétrica CS6W-540MS – SCT	
Potência máxima (P_{MAX})	540 W
Tensão de operação (V_{MP})	41,3 V
Corrente de operação (I_{MP})	13,08 A
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	49,2 V
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	13,90 A
Eficiência	20,9 %
Especificação elétrica CS6W-540MS - NMOT	
Potência máxima (P_{MAX})	405 W
Tensão de operação (V_{MP})	38,7 V
Corrente de operação (I_{MP})	10,47 A
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	46,5 V
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	11,21 A

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 6 - Especificações técnicas mecânicas módulo CS6W-540MS.

Especificação mecânica CS6W-540MS	
Tipo de célula	Mono cristalina
Arranjo de células	144 [2x(12x6)]
Dimensões	2278 x 1134 x 30 mm
Peso	27,6 kg
Cabo	350 mm / 4 mm ² - 12 AWG
Conector	T6 ou MC4-EVO2 ou MC4-EVO2

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da definição do modelo de módulo fotovoltaico, as próximas etapas são a definição do número de módulos no conjunto, o dimensionamento do banco de baterias, o dimensionamento do controlador de carga e por fim o dimensionamento do inversor fotovoltaico. Com o sistema projetado é possível definir e dimensionar os dispositivos de proteção necessários e produzir um esquemático do sistema.

4.1.1 Conjunto de módulos

A partir dos dados disponibilizados pela instalação e folha de dados do módulo é apresentada a Tabela 7, com os valores dos parâmetros apresentados.

Tabela 7 - Parâmetros para o cálculo do número de módulos.

Parâmetros	
E_s	3410 Wh/m ² .dia
A_M	2,58 m ²
η_M	20,9%
E_C	13,33 kWh/dia

Fonte: Produção do próprio autor.

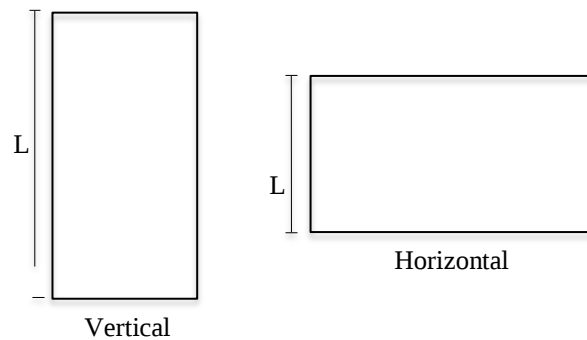
Da equação (3) e com base na Tabela 6 temos que a energia produzida E_P pelo módulo é de 1838,74 Wh/dia. Da equação (4) e com relação a Tabela 6, considerando um mês com 30 dias, temos que o número de módulos N_M a serem instalados é de oito módulos.

Com base na folha de dados do módulo, a tensão V_{OC} de cada módulo é de 49,2 V, considerando dois módulos em série a tensão total seria de 98,4 V, a qual está dentro dos limites admissíveis dos controladores de carga usados em sistemas *off-grid*. Sendo assim, será considerado um arranjo fotovoltaico com dois módulos ligados em série e quatro em paralelo.

Para realizar a instalação dos módulos é preciso considerar a inclinação e área disponível no telhado. Baseado na Tabela 2, sendo a latitude geográfica do local $22,801^\circ$, o melhor ângulo de inclinação dos módulos deve ser o valor da latitude acrescido de 5° , resultando em um ângulo de $27,8^\circ$.

Como o espaço livre para instalação dos módulos é pequeno, neste caso será priorizado o aproveitamento máximo da área de instalação, apresentado na equação (2). Sendo assim serão considerados dois cenários: os módulos instalados na horizontal ou na vertical, conforme Figura 31.

Figura 31 - Orientação da instalação dos módulos na vertical x horizontal.

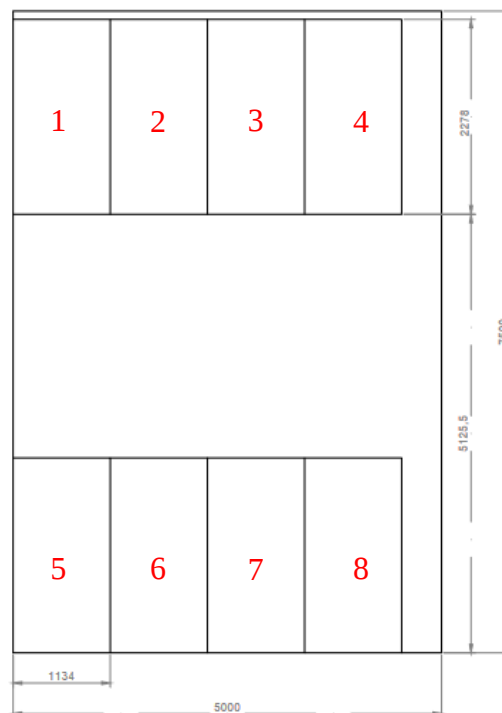


Fonte: Produção do próprio autor.

Na instalação horizontal o comprimento L é 1,134 m e distância d será de 2,551 m. Considerando as dimensões do telhado, não há espaço suficiente para instalação dos oito módulos nessa configuração.

Na instalação vertical, o comprimento do módulo L é igual a 2,278 m e a distância de instalação d será 5,125 m. Para essa condição o espaço livre é suficiente para instalação dos módulos com a inclinação de aproximadamente 28° , sendo dispostos em duas fileiras como é apresentado na Figura 32, cujas cotas estão em milímetros.

Figura 32 - Disposição dos módulos no telhado (sistema *off-grid*).



Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.2 Banco de baterias

Tendo em vista que este é um sistema com um valor razoavelmente alto de potência instalada e que o arranjo de módulos fotovoltaicos proposto possui uma alta potência nominal e, portanto, irá demandar equipamentos que suportem essa potência, foi escolhido seguir com uma tensão de 48 V para o banco de baterias, já que a potência de equipamentos nessa tensão é maior do que se comparada com as de equipamentos de 12 e 24 V. As baterias a serem utilizadas serão do modelo 12MS234 da fabricante Moura Solar e possuem as características definidas na Tabela 8.

Tabela 8 - Especificações técnicas bateria 12MS234.

Especificações técnicas 12MS234	
Tensão nominal	12 V
Capacidade nominal (120h/1,8V _{pe} /25°C)	234 Ah
Vida útil projetada	5 anos
Liga da Grade Positiva	Chumbo Estanho Prata
Liga da Grade Negativa	Chumbo Estanho Prata
Eletrólito	Solução de Ácido Sulfúrico 1250 g/l
Terminais	Tipo “L” / parafuso M8 / aço inox

Fonte: Produção do próprio autor.

Para garantir energia elétrica disponível na instalação em casos de escassez de luz solar ou problemas nos painéis fotovoltaicos, foi considerado que o banco de baterias deve ter energia armazenada para dois dias de consumo. Ou seja, o banco de baterias deve ser dimensionado para que seja capaz de armazenar a energia demandada pela instalação durante dois dias.

Ainda, um fator importante a se definir é a profundidade de descarga das baterias. De forma alcançar um meio termo entre custo e vida útil das baterias foi considerado neste projeto uma profundidade de descarga de 50%. A Tabela 9 resume os dados usados para calcular o banco de baterias, que consistem no consumo de energia diário, número dias que o banco deve prover energia, percentual de descarga da bateria e especificações da bateria.

Tabela 9 - Parâmetros para o cálculo do banco de baterias.

Parâmetros	
E_C	13,33 kWh/dia
n_{dias}	2 dias
P_D	50 %
V_{BANCO}	48 V
V_{BAT}	12 V
C_{BAT}	234 Ah

Fonte: Produção do próprio autor.

Portanto, de acordo com a equação (5) e a Tabela 8, o valor E_A armazenado no banco durante dois dias deve ser de 53,33 kWh. Da equação (6) e conforme a Tabela 8, tem-se que o sistema requer quatro baterias em série. Ainda, a partir da equação (6) e da Tabela 8 é obtido uma capacidade C_{BANCO} de 1111,11 Ah resultando na equação (7) o número de cinco baterias em paralelo. Dessa forma o arranjo do banco de baterias é definido por quatro baterias em série e cinco em paralelo, totalizando vinte baterias.

4.1.3 Controlador de carga

A especificação do controlador de carga deve considerar a tensão de operação do sistema e a corrente máxima dos módulos. (VILLALVA, 2015). Como definido anteriormente temos uma tensão de operação do sistema de 48 V e, portanto, essa deve ser a tensão do controlador.

A corrente elétrica máxima dos módulos é obtida da corrente de curto-circuito de cada módulo. A partir da ficha técnica do módulo utilizado tem-se que a corrente de curto-circuito em STC I_{SC} é de 13,9 A. Assim, a corrente total será dada pela soma das correntes I_{SC} dos módulos em paralelo. Com quatro módulos em paralelo a corrente máxima será de 55,6 A. Ainda, Villalva (2015) sugere a aplicação de um fator de segurança de 30%, o que resulta em uma corrente de 72,28 A. Dessa forma temos a especificação do controlador de carga que deve ser de 48 V com corrente maior ou igual a 72,28 A.

Dentre os controladores de carga disponíveis no mercado, optou-se por um modelo que se enquadrou nos parâmetros calculados. O modelo escolhido é o TRACER 10415AN da EPEVER e suas características estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Especificações técnicas controlador de carga 10415AN.

Especificações técnicas 10415AN	
Tensão nominal	48 V
Tipo de bateria	Chumbo-ácido
Corrente de carga	100 A
Potência de carga	5000 W
Eficiência MPPT	$\leq 99,5\%$
Tensão FV máxima de circuito aberto	138 V (25°C)

Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.4 Inversor

A especificação do inversor deve estar em conformidade com a tensão de operação do sistema e com a potência a ser alimentada. A tensão do inversor deve ser de 48 V_{CC} / 127 V_{CA} de forma a alimentar os equipamentos CA da instalação. Em termos de potência, temos que a potência instalada é de 1.036 W.

Novamente consultando os equipamentos disponíveis no mercado aplicados em sistemas fotovoltaicos, foi possível encontrar o modelo de inversor IP3000-41 da EPEVER, cujas especificações técnicas podem ser encontradas na Tabela 11. É possível observar que o valor de potência nominal do inversor é maior que a potência necessária, porém optou-se por este inversor para que haja uma folga no valor de potência disponível, possibilitando também um futuro aumento na potência instalada do estabelecimento.

Tabela 11 - Especificações técnicas inversor IP3000-41.

Especificações técnicas IP3000-41	
Tipo de onda	Senoidal pura
Tensão de entrada	48 V _{CC}
Tensão de saída	127 V _{CA}
Potência CC	3000 W
Potência de surto	6000 W

Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.5 Parâmetros especificados para o sistema *off-grid*

Como resultado do dimensionamento descrito anteriormente foi possível obter o sistema *off-grid* cujos principais parâmetros estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resumo do sistema *off-grid*.

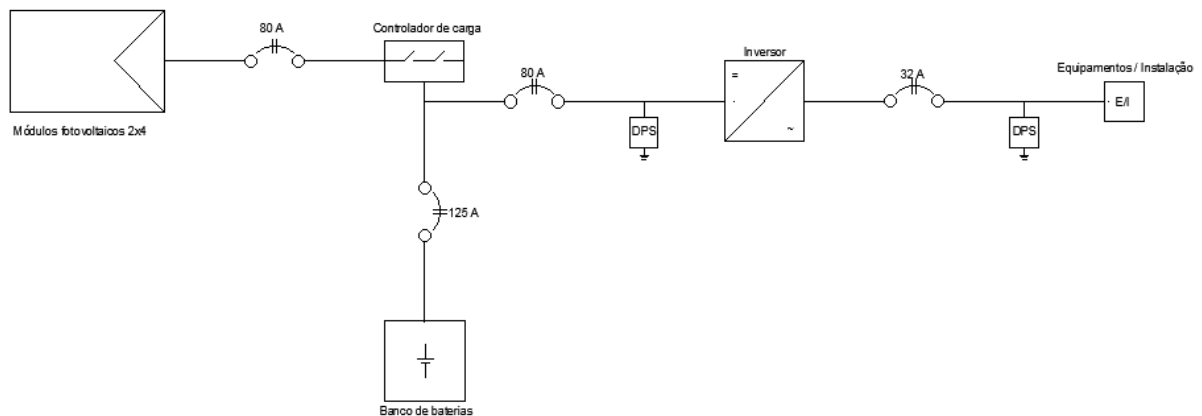
Parâmetro	Especificação
Conjunto de módulos	
Número total de módulos	8
Número de módulos em série	2
Número de módulos em paralelo	4
Potência do conjunto	4320 W
Geração de energia média diária	14,71 kWh
Banco de baterias	
Tensão nominal / Capacidade nominal	12 V / 234 Ah
Número total de baterias	20
Número de baterias em série	4
Número de baterias em paralelo	5
Controlador de carga	
Tensão nominal / Corrente de carga	48 V / 100 A
Inversor	
Tensão entrada / saída - Potência	48 V / 127 V – 3000 W

Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.6 Diagrama elétrico

A Figura 33 apresenta o diagrama elétrico unifilar do projeto, esquematizado por meio do software AutoCad. Nela é possível observar a presença do controlador de carga entre os módulos e a bateria, assim como a presença do inversor CC/CA para alimentar as cargas. Ainda, foram dimensionados quatro disjuntores e dois DPS para proteção do sistema. O dimensionamento dos dispositivos de proteção, disjuntores e DPS, citados na lista de equipamentos e apresentados no diagrama será apresentado na subseção 4.1.6.

Figura 33 - Diagrama unifilar do projeto *off-grid*.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 13 apresenta a lista de equipamentos citados no dimensionamento e diagrama elétrico.

Tabela 13 - Equipamentos do sistema *off-grid*.

Descrição	Quantidade
Módulo CS6W-540MS Canadian Solar	8
Baterias 12MS234 Moura Solar	20
Controlador 10415AN EPEVER	1
Inversor IP3000-41 EPEVER	1
Mini disjuntor 80A WEG	2
Mini disjuntor 125A WEG	1
Mini disjuntor 32A WEG	1
DPS SOLAR 150 V CLAMPER	1
DPS CA 175V CLAMPER	2

Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.7 Dispositivos de proteção

Para a proteção do sistema fotovoltaico *off-grid* foram dimensionados dispositivos de proteção contra sobrecorrente e dispositivos de proteção contra surto (DPS).

- **Proteção contra sobrecorrente entre o arranjo fotovoltaico e o circuito de aplicação**

A corrente nominal I_N de dispositivos de proteção contra sobrecorrente em arranjos fotovoltaicos deve atender à seguinte condição: $1,25 \times I_{SC-ARRANJO} < I_N < 2,4 \times I_{SC-ARRANJO}$ (NBR 16690:2019).

Sendo o arranjo composto por quatro módulos em paralelo e a corrente I_{SC} de cada módulo 13,9 A, o valor de I_N deve estar entre 69,5 e 133,44 A. Ainda, a NBR 16690 discorre da localização deste dispositivo de proteção, que deve estar entre o cabo do arranjo fotovoltaico e o circuito de aplicação. Dessa forma, para este projeto foi escolhido como dispositivo de proteção contra sobrecorrente um disjuntor CC de 80 A que deve ser instalado entre o arranjo fotovoltaico e o controlador de carga.

Ainda, visando melhorar a proteção e facilitar a manutenção do sistema, e tendo em vista que o banco de baterias é uma possível fonte de falhas no sistema, foi escolhido instalar um disjuntor entre o controlador de carga e o banco e outro entre o banco e o inversor.

Para a proteção do controlador de carga, o dimensionamento foi feito utilizando a corrente nominal do equipamento, 100 A, acrescida de um fator de segurança de 25%, resultando em um disjuntor de 125 A.

Para a proteção do inversor, foi considerada a corrente para 100% da potência do equipamento, ou seja, o valor da potência máxima dividida pela tensão do banco de baterias (3000W/48V), também considerando um fator de segurança de 25%, o que resulta em um disjuntor de 80 A. Portanto, para a proteção contra sobrecorrente do lado CC foi definido o uso dos dispositivos apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Disjuntores CC do sistema *off-grid*.

Dispositivo	Corrente nominal	Tipo de curva
Mini disjuntor bipolar WEG	80 A	C
Mini disjuntor bipolar WEG	125 A	C
Mini disjuntor bipolar WEG	80 A	C

Fonte: Produção do próprio autor.

Vale ressaltar que neste projeto optou-se pelo uso dos disjuntores com curva de atuação do tipo C, sendo este o tipo mais utilizado e econômico no mercado. Os disjuntores de curva C, de acordo com a fabricante WEG (2023), atuam para correntes de 5 a 10 vezes a nominal e são indicados para uso em circuitos com cargas indutivas enquanto os de curva B são usados para circuitos resistivos e os de curva D para circuitos indutivos de alta potência.

- **Proteção contra sobrecorrente entre o inversor e a instalação**

Para proteção do lado CA deve ser considerada a corrente máxima que pode ser obtida do inversor acrescida de um fator de segurança de 25%, como foi considerado anteriormente no lado CA. A corrente máxima no inversor do lado de corrente alternada será a potência nominal do inversor dividida pela tensão CA do inversor (3000/127), o que resulta em um disjuntor de 32 A. Portanto, para a proteção contra sobrecorrente do lado CA foi definido o uso do disjuntor apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Disjuntor CA do sistema *off-grid*.

Dispositivo	Corrente nominal	Tipo de curva
Mini disjuntor bipolar WEG	32 A	C

Fonte: Produção do próprio autor.

- **Proteção contra surtos entre o controlador de carga e o inversor**

De acordo com a Comissão Eletrotécnica Internacional, do inglês International Electrotechnical Commission (IEC) 61643-32, a tensão de operação contínua U_c deve ser maior ou igual a máxima tensão do arranjo fotovoltaico. Sendo assim, o valor de U_c deverá ser superior a 98,4 V. Em relação ao nível de proteção U_p do DPS, segundo a norma, o valor deve ser menor que 1,5 kV. Portanto, para a proteção contra surtos do lado CC foi definido o uso do DPS apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - DPS CC do sistema *off-grid*.

DPS SOLAR CC CLAMPER	
Tensão de operação	150 V
Corrente de descarga nominal	18 kA
Corrente de descarga máxima	40 kA
Nível de proteção	1 kV

Fonte: Produção do próprio autor.

- **Proteção contra surtos entre o inversor e a instalação**

Para o lado CA, ainda consultando a IEC 61643-32, tem-se que o valor mínimo da tensão de operação contínua U_c é de 139,7 V e que o valor do nível de proteção U_p deve

ser menor que 1,5 kV. Portanto, para a proteção contra surtos do lado CA foi definido o uso do DPS apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - DPS CA do sistema *off-grid*.

DPS CA CLAMPER	
Tensão de operação	175 V
Corrente de descarga nominal	20 kA
Corrente de descarga máxima	45 kA
Nível de proteção	1,2 kV

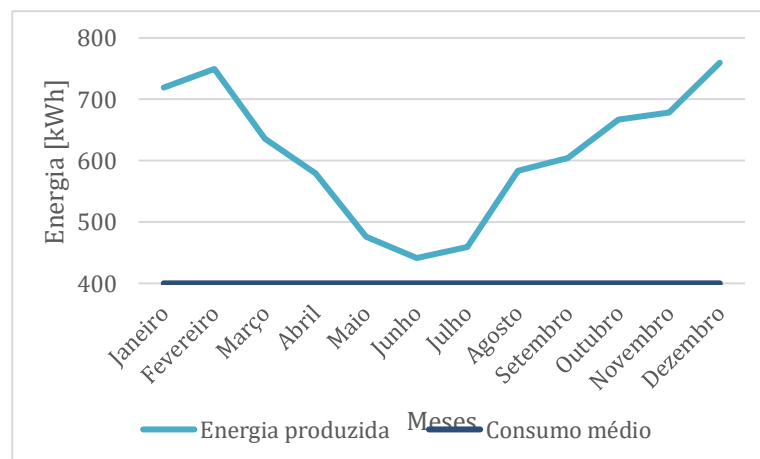
Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.8 Geração de energia

A partir dos níveis de insolação diária obtidos por meio da ferramenta disponibilizada pelo CRESESB é possível gerar uma estimativa da energia gerada pelo sistema ao longo do ano. Para estimar a energia produzida em um determinado mês, é necessário calcular a produção de energia diária de cada módulo a partir da equação (3), apresentada na subseção 4.1.1, utilizando o valor de insolação média do respectivo mês. Em seguida deve-se multiplicar o resultado pelo número de módulos que o sistema possui e pelo número de dias no mês.

Com base no cálculo apresentado é possível gerar o gráfico da Figura 34, que mostra uma análise do comportamento anual da geração de energia do sistema *off-grid* projetado.

Figura 34 - Gráfico da geração anual do sistema *off-grid*.



Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da figura, é possível notar que durante a maior parte do ano a geração de energia fica bem acima do valor de consumo estipulado, mas, nos meses de baixa irradiação solar o valor está mais próximo dos 400 kWh. Isto ocorre pois o sistema foi dimensionado para atender os meses com baixa incidência solar.

Vale ressaltar que um dimensionamento de menor porte ao que foi apresentado não iria produzir energia suficiente para os meses de baixa incidência solar, causando insuficiência no fornecimento de energia para a instalação e para o armazenamento do banco de baterias, podendo ocasionar problemas no estabelecimento, que conta com produtos armazenados em refrigeradores e freezers.

4.2 DIMENSIONAMENTO *ON-GRID*

A primeira etapa para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico *on-grid* consiste na definição do módulo fotovoltaico a ser utilizado. Assim, neste trabalho, o modelo escolhido para o projeto foi o mesmo utilizado no sistema *off-grid*.

A partir da definição do modelo de módulo fotovoltaico, as próximas etapas são a definição do número de módulos no conjunto e o dimensionamento do inversor fotovoltaico. Com o sistema projetado é possível definir e dimensionar os dispositivos de proteção necessários e produzir um esquemático do sistema.

4.2.1 Conjunto de módulos

Considerando a taxa mínima que deve ser paga para a concessionária, segundo a Resolução 1000/2021 da ANEEL para instalações bifásicas o valor é equivalente a 50 kWh, pode-se descontar este valor de consumo médio usado para o dimensionamento já que consumindo ou não, o valor deverá ser pago. Sendo assim, para o projeto *on-grid* será considerado o consumo médio mensal de 350 kWh.

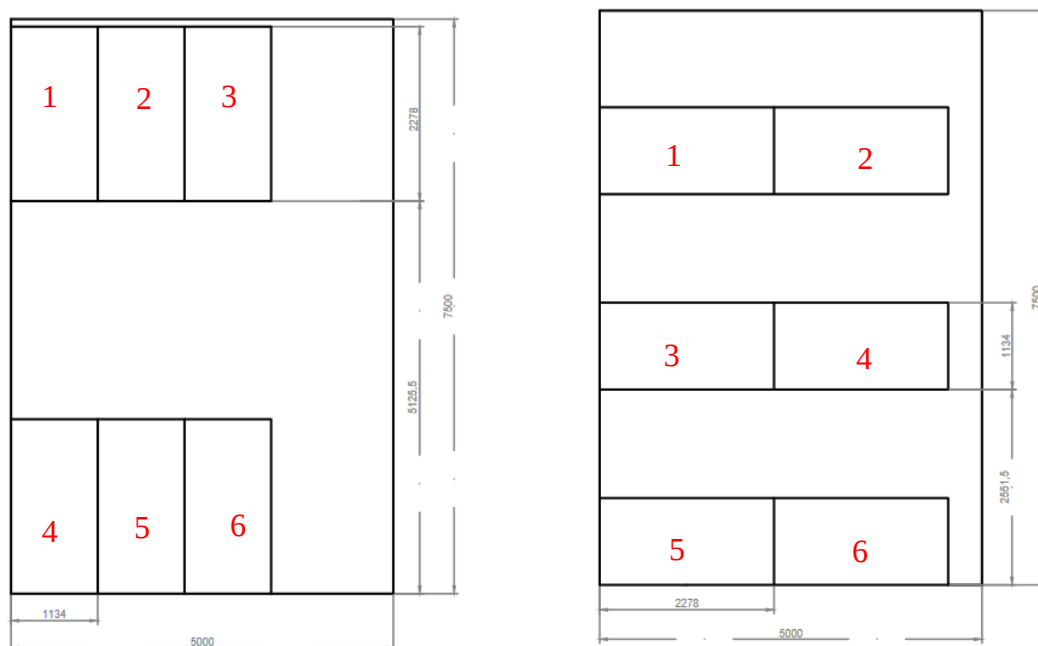
Para calcular o número de módulos a serem instalados no sistema *on-grid* também deve-se aplicar a equação (3) e equação (4), entretanto, como o módulo escolhido não foi alterado, o resultado da equação (3) permanece o mesmo já calculado para o sistema *off-grid* na seção 3.2.1, ou seja, 1832,74 kWh/dia. Já para a equação (4), considerando o novo valor de consumo médio diário E_C de 11,67 kWh, temos que o número de módulos a serem

instalados equivaleria a 6,36. A diferença na geração de energia ao utilizar seis ou sete módulos é relativamente baixa, por isso será optado por utilizar apenas seis módulos.

Em relação a instalação dos módulos, do mesmo modo apresentado anteriormente, de acordo com a Tabela 2, sendo a latitude geográfica do local $22,801^\circ$, o melhor ângulo de inclinação dos módulos é de $27,8^\circ$. Recapitulando os cálculos já apresentados na seção *on-grid*, na instalação vertical dos módulos a distância de instalação d deve ser 5,125 m e na instalação horizontal a distância d deve ser de 2,551 m.

Como neste caso o número de módulos é menor, é possível realizar a instalação utilizando os módulos tanto na posição vertical quanto na horizontal. Por fim, os seis módulos podem ser dispostos no telhado com uma inclinação de aproximadamente 28° nas posições apresentadas na Figura 35, com as contas dadas em milímetros.

Figura 35 - Disposição dos módulos no telhado (sistema *on-grid*).



Fonte: Produção do próprio autor.

Como dito anteriormente, é comum que os módulos do sistema *on-grid* sejam conectados em série para obter tensões mais elevadas, portanto, em termos de ligação elétrica será considerado todos os módulos em série, formando uma *string* de seis módulos.

4.2.2 Inversor

Segundo Villalva (2015), a escolha do inversor deve levar em conta dois critérios: a tensão de circuito aberto da string, que não pode ultrapassar a tensão máxima permitida na entrada do inversor e a potência do inversor, que deve ser igual ou superior à potência de pico do conjunto de módulos.

Sendo a tensão de circuito aberto V_{OC} de cada módulo 49,2 V, com seis módulos na string, o valor da tensão de circuito aberto total será de 295,2 V. Ainda, Villalva (2015) sugere a aplicação de um fator de segurança de 10%, resultando em 324,72 V. Já em termos de potência, sendo 540W a potência máxima de cada módulo, temos que a potência mínima do inversor deve ser 3240 W.

Para essa aplicação, foi escolhido o modelo de inversor FRONIUS PRIMO 8.2-1 que atende todas as necessidades do sistema. As especificações técnicas do inversor são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Especificações técnicas FRONIUS 8.2-1.

Entrada (CC)	
Potência máxima	12,3 kWp
Tensão máxima	1000 V
Tensão mínima	80 V
Tensão nominal	710 V
Faixa de tensão MPP	80-800 V
Número de entradas MPP	1
Número de <i>strings</i> por MPPT	1
Corrente máxima	18 A
Corrente máxima de curto-circuito	27 A
Saída (CA)	
Potência nominal	8,2 kW
Corrente máxima	35,7 A
Tensão CA nominal	220 V

Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.3 Parâmetros especificados para o sistema *on-grid*

Como resultado do dimensionamento descrito anteriormente foi possível obter o sistema *on-grid* cujos principais parâmetros estão apresentados na Tabela 19.

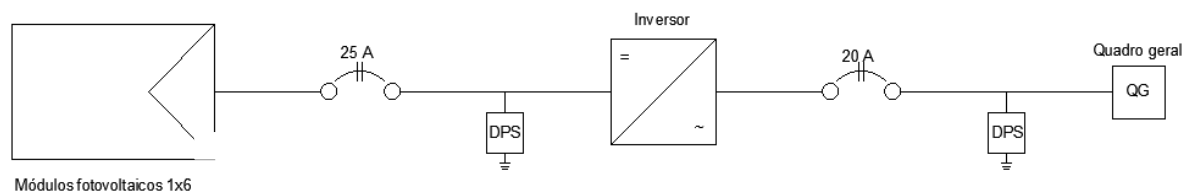
Tabela 19 - Resumo do sistema *on-grid*.

Parâmetro	Especificação
Conjunto de módulos	
Número total de módulos	8
Número de módulos em série	2
Número de módulos em paralelo	4
Potência do conjunto	3240 W
Geração de energia média diária	11,03 kWh
Inversor	
Tensão nominal / Potência	220V / 8,2 kW

Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.4 Diagrama elétrico

A Figura 36 apresenta o diagrama elétrico unifilar do projeto, esquematizado por meio do software AutoCad. Nela é possível observar a presença do inversor entre os módulos e o quadro geral da instalação. Ainda, foram dimensionados dois disjuntores e dois DPS para proteção do sistema. O dimensionamento dos dispositivos de proteção, disjuntores e DPS, citados na lista de equipamentos e apresentados no diagrama será apresentado na subseção 4.2.4.

Figura 36 - Diagrama unifilar do projeto *on-grid*.

Fonte: Produção do próprio autor

A Tabela 20 apresenta a lista de equipamentos citados no dimensionamento e diagrama elétrico.

Tabela 20 - Equipamentos do sistema *on-grid*.

Descrição	Quantidade
Módulo CS6W-540MS	6
Inversor Fronius 8.2-1	1
Mini disjuntor 25A - WEG	1
Mini disjuntor 20A - WEG	1
DPS SOLAR CLAMPER 300V	1
DPS CA CLAMPER 175V	2

Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.5 Dispositivos de proteção

Para a proteção do sistema fotovoltaico *on-grid* foram dimensionados dispositivos de proteção contra sobrecorrente e dispositivos de proteção contra surto (DPS).

- **Proteção contra sobrecorrente entre a *string* e o inversor**

Segunda a NBR 16690:2019, a corrente nominal do dispositivo de proteção contra sobrecorrente em uma série fotovoltaica (*string*) deve atender as seguintes condições: $1,5 \times I_{SC-MOD} < I_n < 2,4 \times I_{SC-MOD}$ e $I_n \leq I_{MOD\ MAX\ OCPR}$.

Sendo os valores de $I_{MOD\ MÁX\ OCPR}$ e $I_{SC\ MOD}$, respectivamente, 25 A e 13,9 A, o dispositivo de proteção deve estar entre $20,85\ A < I_n \leq 25\ A$. Sendo assim, o dispositivo escolhido um disjuntor CC de 25 A, apresentado na Tabela 21, que deve ser ligado entre a *string* e o inversor.

Tabela 21 - Disjuntor CC do sistema *on-grid*.

Dispositivo	Corrente nominal	Tipo de curva
Minidisjuntor bipolar WEG	25 A	C

Fonte: Produção do próprio autor.

- **Proteção contra surto entre a *string* e o inversor**

O dimensionamento do DPS, seguindo as diretrizes da IEC 61643-32, resulta em uma tensão de operação contínua U_c superior a 295,2 V e o nível de proteção do DPS menor

que 4,5 kV. Portanto, para a proteção contra surtos do lado CC foi definido o uso do DPS apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - DPS CC do sistema *on-grid*.

DPS SOLAR CC CLAMPER	
Tensão de operação	300 V
Corrente de descarga nominal	18 kA
Corrente de descarga máxima	40 kA
Nível de proteção	2 kV

Fonte: Produção do próprio autor.

- **Proteção contra sobrecorrente entre o inversor e a instalação**

Assim como para o dimensionamento *off-grid*, a proteção de sobrecorrente para o lado AC pode ser dimensionada para a potência nominal do inversor acrescida de um fator de segurança de 25%. Sendo a potência 3000W e a tensão 220 V, o dispositivo de proteção escolhido é um disjuntor CA de 20 A, apresentado na Tabela 23, conectado entre o inversor e o medidor de energia.

Tabela 23 - Disjuntor CA do sistema *on-grid*.

Dispositivo	Corrente nominal	Tipo de curva
Minidisjuntor bipolar WEG	20 A	C

Fonte: Produção do próprio autor.

- **Proteção contra surto entre o inversor e a instalação**

Para o DPS do lado AC no sistema *on-grid* foi consultada a NBR 5410:2004. Sendo o esquema de aterramento TN-S, o valor definido para a tensão de operação contínua U_c deve ser superior a 139,7 V para fase-PE e 127 V para neutro-PE. Em relação ao nível de proteção, este deve ser inferior a 1,5 kV. Portanto, para a proteção contra surtos do lado CA foi definido o uso do DPS apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - DPS CA do sistema *on-grid*.

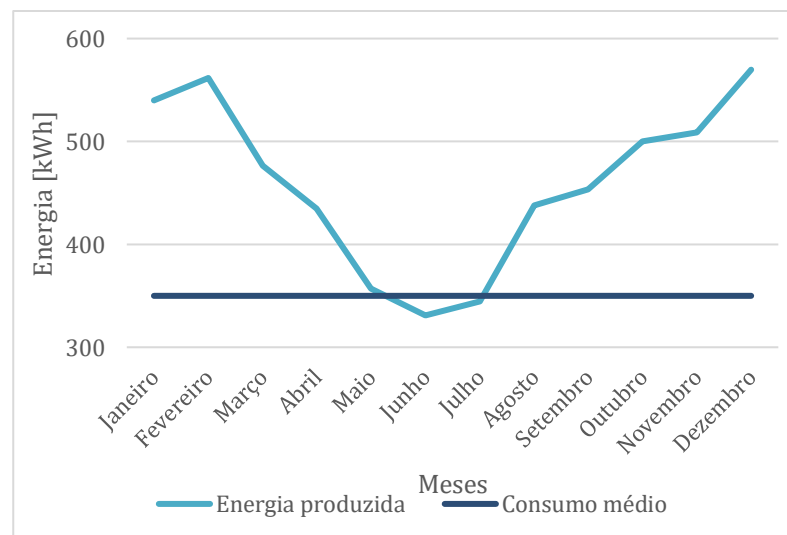
DPS CA CLAMPER	
Tensão de operação	175 V
Corrente de descarga nominal	20 kA
Corrente de descarga máxima	45 kA
Nível de proteção	1,2 kV

Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.6 Geração de energia

A análise do comportamento anual da geração de energia do sistema *on-grid* projetado, obtida da mesma forma já apresentada para o sistema *off-grid*, pode ser vista na Figura 37.

De acordo com a figura é possível observar que a geração de energia também fica acima do valor base durante boa parte do ano, entretanto, nos meses de junho e julho, é possível ver que a geração fica abaixo do valor base. Isso acontece devido a escolha que foi feita de serem utilizados seis módulos ao invés de sete.

Figura 37 - Gráfico da geração anual do sistema *on-grid*.

Fonte: Produção do próprio autor.

Essa escolha foi considerada como válida pois o sistema está conectado à rede, sendo assim, no caso dos meses em que a geração está um pouco abaixo do dimensionado, o estabelecimento não sofre falta de energia, e o valor que ele teria que consumir da rede é um valor baixo, cerca de 5 a 20 kWh no mês. Além disso, com seis módulos, o sistema já está

gerando mais energia do que necessita durante o ano, o acréscimo de outro módulo deixaria o sistema superdimensionado.

4.3 PLANILHA DE CÁLCULO

Durante a execução deste trabalho, com o intuito de criar uma ferramenta para auxiliar projetos da mesma categoria, foi criada uma planilha de cálculo para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, tanto *on-grid* como *off-grid*.

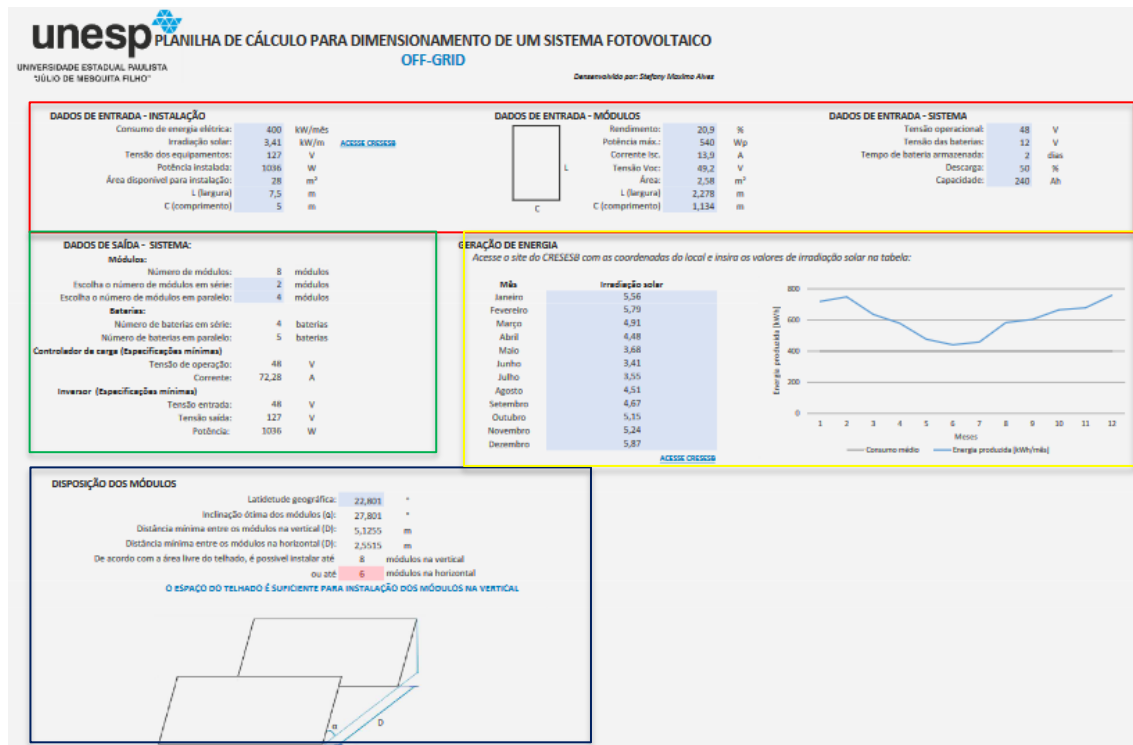
A ferramenta foi desenvolvida com base na metodologia apresentada e a partir da inserção dos dados da instalação é possível obter o número de módulos necessários, o tamanho do banco de baterias, as especificações mínimas de controlador de carga e inversor e um panorama de geração de energia para o sistema dimensionado. Ainda, é possível avaliar se o espaço disponível para instalação dos painéis é suficiente.

O dimensionamento *on-grid* e *off-grid* é feito de forma independente e cada sistema possui uma planilha própria, sendo assim o usuário pode alternar entre o dimensionamento dos dois tipos de sistema apenas selecionando a planilha correta. A seguir será descrito o funcionamento e modo de uso da ferramenta.

- **Planilha *off-grid***

A planilha para o dimensionamento do sistema fotovoltaico *off-grid* é apresentada pela Figura 38. Na figura estão destacados os dados de entrada, em vermelho, os dados de saída, em verde, a geração de energia, em amarelo e a disposição dos módulos, em azul.

Figura 38 - Planilha de cálculo dimensionamento *off-grid*.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os dados de entrada estão organizados entre dados da instalação, do módulo e do sistema, como pode ser visto na Figura 39. Estes são os dados que o usuário deve inserir na planilha para realização dos cálculos e seus valores devem ser inseridos nas células destacadas em azul.

Figura 39 - Dados de entrada da planilha *off-grid*.

DADOS DE ENTRADA - INSTALAÇÃO		DADOS DE ENTRADA - MÓDULOS		DADOS DE ENTRADA - SISTEMA	
Consumo de energia elétrica:	400 kW/mês			Tensão operacional:	48 V
Irradiação solar:	3,41 kW/m			Tensão das baterias:	12 V
Tensão dos equipamentos:	127 V			Tempo de bateria armazenada:	2 dias
Potência instalada:	1036 W			Descarga:	50 %
Área disponível para instalação:	28 m²			Capacidade:	240 Ah
L (largura):	7,5 m				
C (comprimento):	5 m				

Fonte: Produção do próprio autor.

Os dados de saída do sistema, apresentados na Figura 40, são os resultados obtidos para o dimensionamento do sistema e estão organizados entre os dados de saída dos módulos, baterias, controlador de carga e inversor. Nesta etapa as informações são preenchidas automaticamente após o usuário finalizar o preenchimento dos dados de entrada, sendo necessário apenas inserir o número de módulos em série e em paralelo, nas respectivas

células destacadas em azul, para que a ferramenta calcule as especificações do restante dos equipamentos do sistema.

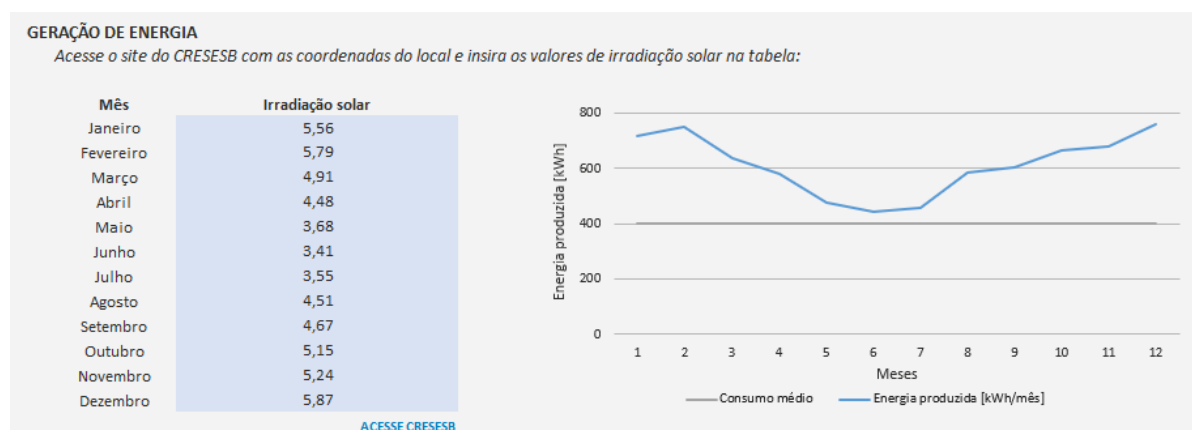
Figura 40 - Dados de saída da planilha *off-grid*.

DADOS DE SAÍDA - SISTEMA:		
Módulos:		
Número de módulos:	8	módulos
Escolha o número de módulos em série:	2	módulos
Escolha o número de módulos em paralelo:	4	módulos
Baterias:		
Número de baterias em série:	4	baterias
Número de baterias em paralelo:	5	baterias
Controlador de carga (Especificações mínimas)		
Tensão de operação:	48	V
Corrente:	72,28	A
Inversor (Especificações mínimas)		
Tensão entrada:	48	V
Tensão saída:	127	V
Potência:	1036	W

Fonte: Produção do próprio autor.

A geração de energia é onde o usuário consegue gerar o gráfico do comportamento estimado da geração de energia anual do sistema. Para isso, como pode ser visto na Figura 41, o usuário deve acessar o site do CRESESB e inserir na tabela apresentada os valores de insolação média da região para cada mês no ano. Após preencher a tabela, o gráfico é atualizado com a estimativa de geração de energia.

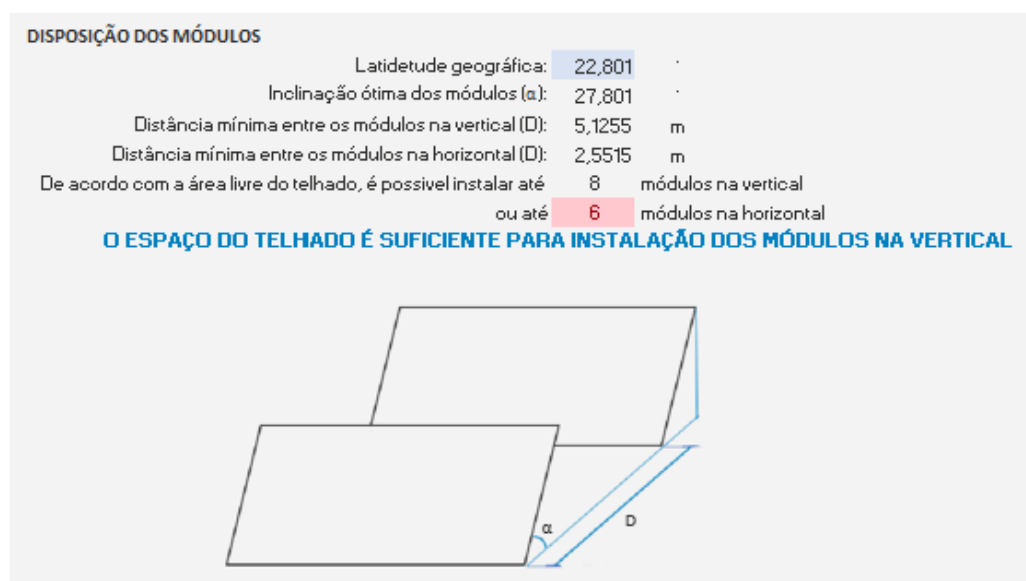
Figura 41 - Estimativa da geração de energia anual.



Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, o usuário pode ainda verificar se o espaço disponível do telhado é suficiente para a instalação dos módulos. Para isso, na área de disposição dos módulos, apresentada na Figura 42, devem ser inseridas a informação da latitude geográfica do local de instalação. A partir dessa informação e dos dados de entrada já inseridos a ferramenta analisa se há ou não disponibilidade para a instalação dos módulos, em qual orientação devem ser instalados, e qual deve se o distanciamento mínimo entre eles.

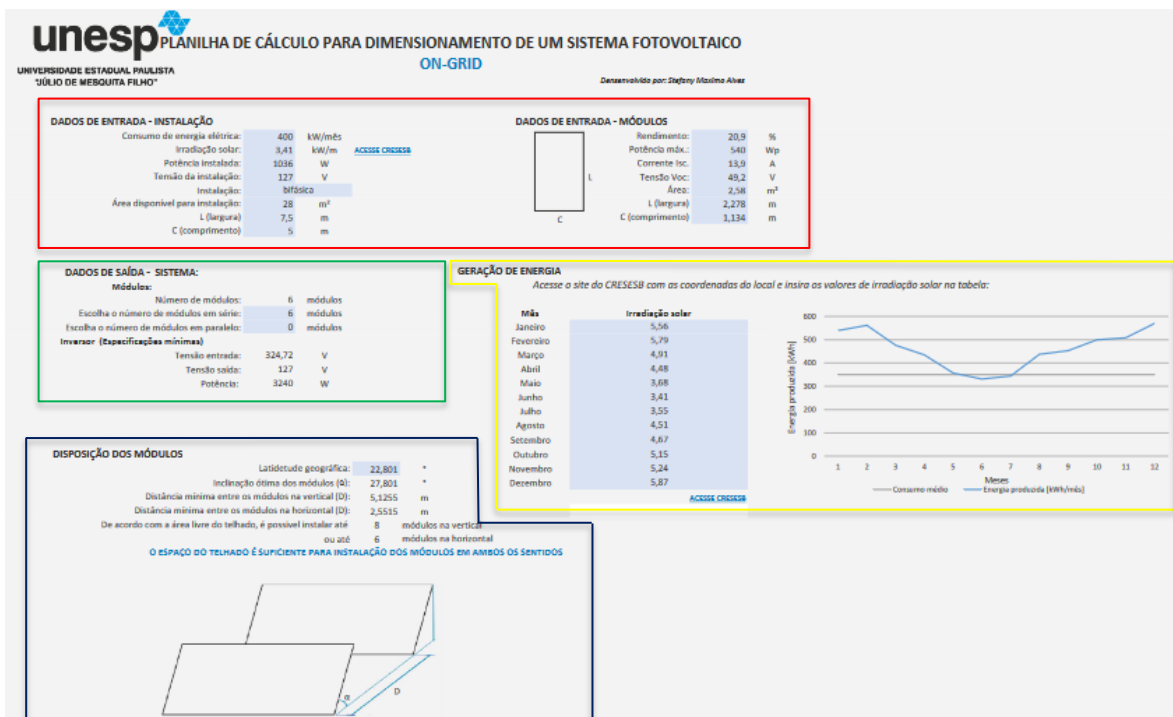
Figura 42 - Análise da disposição dos módulos.



Fonte: Produção do próprio autor.

- **Planilha *on-grid***

A planilha para o dimensionamento do sistema fotovoltaico *on-grid*, apresentada pela Figura 43, é similar a planilha *off-grid* descrita anteriormente. Na figura é possível perceber que estão destacados os dados de entrada, em vermelho, os dados de saída, em verde, a geração de energia, em amarelo e a disposição dos módulos, em azul.

Figura 43 - Planilha de cálculo dimensionamento *on-grid*.

Fonte: Produção do próprio autor.

Os dados de entrada estão organizados entre dados da instalação e do módulo, como pode ser visto na Figura 44. Estes são os dados que o usuário deve inserir ou selecionar na planilha para realização dos cálculos e seus valores devem ser inseridos nas células destacadas em azul.

Figura 44 - Dados de entrada da planilha *on-grid*.

DADOS DE ENTRADA - INSTALAÇÃO				DADOS DE ENTRADA - MÓDULOS			
Consumo de energia elétrica:	400	kW/mês			Rendimento:	20,9	%
Irradiação solar:	3,41	kW/m	ACESSE CRESES8		Potência máx.:	540	Wp
Potência instalada:	1036	W			Corrente Isc:	13,9	A
Tensão da instalação:	127	V			Tensão Voc:	49,2	V
Instalação:	bifásica				Área:	2,58	m²
Área disponível para instalação:	28	m²			L (largura):	2,278	m
L (largura):	7,5	m			C (comprimento):	1,134	m
C (comprimento):	5	m					

Fonte: Produção do próprio autor.

Os dados de saída do sistema, apresentados na Figura 45, são os resultados obtidos para o dimensionamento do sistema e estão organizados entre os dados de saída dos módulos e inversor. Nesta etapa as informações são preenchidas automaticamente após o usuário finalizar o preenchimento dos dados de entrada, sendo necessário apenas inserir o

número de módulos em série e em paralelo, nas respectivas células destacadas em azul, para que a ferramenta calcule as especificações do restante dos equipamentos do sistema.

Figura 45 - Dados de saída da planilha *on-grid*.

DADOS DE SAÍDA - SISTEMA:		
Módulos:		
Número de módulos:	6	módulos
Escolha o número de módulos em série:	6	módulos
Escolha o número de módulos em paralelo:	0	módulos
Inversor (Especificações mínimas)		
Tensão entrada:	324,72	V
Tensão saída:	127	V
Potência:	3240	W

Fonte: Produção do próprio autor.

A geração de energia e a disposição dos módulos na planilha *on-grid* funcionam da mesma forma como foram descritos anteriormente para a planilha *off-grid*.

5 CONCLUSÃO

As energias renováveis são de grande importância para a sociedade, sendo seu principal benefício a diminuição dos gases do efeito estufa, portanto o estudo de aplicações e melhorias dos sistemas de energia limpa, como os sistemas solares, é de grande valor para as áreas de engenharia e ciências.

Um estudo comparativo entre o dimensionamento *on-grid* e *off-grid* corrobora o fato de que sistemas *on-grid* são mais simples de se implementar, além de serem usados como forma de adquirir desconto na fatura de energia elétrica. Porém, nem sempre sistemas *on-grid* são viáveis e em locais onde não existe rede elétrica pública, a solução para geração de energia pode ser via sistema *off-grid*.

Em questão de geração de energia ambos os sistemas foram projetados baseando-se nas mesmas considerações, sendo elas: um consumo mensal de 400 kWh, uma irradiação solar equivalente ao pior valor do ano e utilizando o mesmo módulo fotovoltaico.

No geral, a diferença mais marcante entre os dois tipos de dimensionamento é o custo. Em uma breve análise, o custo estimado dos equipamentos para o sistema fotovoltaico *off-grid* dimensionado foi de aproximadamente metade do custo do sistema *on-grid*. O principal ponto que causa essa discrepância entre os valores é o uso do banco de baterias no sistema autônomo. Além das baterias terem um custo elevado, para suprir a necessidade de consumo e especificações da instalação em estudo, foi dimensionado um banco com uma grande quantidade de baterias, elevando muito o custo do projeto.

Outro ponto a ser destacado é o espaço para instalação, tanto dos módulos quanto dos equipamentos. Apesar do espaço do telhado ser suficiente para a instalação tanto dos 6 ou 8 módulos, o local estudado possui pouca área livre para a instalação do restante dos equipamentos. Um sistema com vinte baterias, como o que foi calculado para o sistema *off-grid*, demanda um espaço muito maior do que o que se tem disponível, inviabilizando a aplicação desse sistema no caso em estudo. Com base nesses fatos, a única escolha viável é a instalação por meio do sistema *on-grid*, que possui um menor custo e requer menos espaço para a instalação. Porém, cada instalação requer um estudo particular, baseado nas características físicas do local e nas necessidades de quem irá adquirir o sistema.

Portanto, é possível dizer que do ponto de vista econômico, o sistema *off-grid* é mais caro que o *on-grid*, e quanto maior o consumo do estabelecimento, maior será a diferença entre os valores. Além disso, o sistema *on-grid* pode trazer mais confiabilidade e

segurança para estabelecimentos que possuem alimentos e produtos que são armazenados em locais refrigerados e que podem ser comprometidos em caso de falta de energia.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

O dimensionamento e estudo feitos neste projeto tem como prioridade a análise entre os sistemas *on-grid* e *off-grid* aplicados em um imóvel comercial, porém existem outras possibilidades que podem ser utilizadas e comparadas, como a aplicação de sistemas solares híbridos, que empregam outras formas de geração aliadas a energia solar, ou até mesmo o uso de outras fontes de energias renováveis, como a energia eólica.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Geração distribuída**. 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 05 nov. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa Nº 1000**. Brasília. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2023
- ALVES, G. C. C. **Sistema fotovoltaico on-grid**: estudo de caso em uma empresa de refrigeração em Campo Mourão-PR. 2017. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campos Mourão, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/7008>. Acesso em: 19 out. 2024.
- ARAÚJO, A. L. P. L. *et al.* Topologias em traçador de curva i-v para módulos fotovoltaicos. *In*: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 8., 2020, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: CBENS, 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/829>. Acesso em: 28 nov. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16690**: instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BARTELEGA, T. J. T. **Estudo do consumo de energia elétrica de uma residência visando viabilizar a implantação de painéis fotovoltaicos**. 2015. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/141f41c0-ed1b-4d94-bc13-9ec418a0a6bd/content>. Acesso em: 21 nov. 2023.
- BOYLESTAD, R. **Introdução à análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012. 976 p.
- CRESESB. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>. Acesso em: 04 nov. 2023.
- INTERNACIONAL STANDARD. **IEC 61643-32**: low-voltage surge protective devices - part 32: surge protective devices connected to the d.c. side of photovoltaic installations - selection and application principles. Genebra: ISO/IEC, 2017.
- NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 29 out. 2024.

PINHO, T. J.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro. CEPEL-CRESESB. 2014. 530p.

PORTAL SOLAR. **Célula fotovoltaica**: tudo o que você precisa saber. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>. Acesso em: 28 out. 2024.

PORTAL SOLAR. **Passo a passo da fabricação do painel solar**. 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em: 27 nov. 2023.

SOUSA, F. R. S. **Viabilidade técnica e econômica na utilização de um sistema fotovoltaico para alimentação de luminárias LED na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá SP**. 2013. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/5ef84ad9-1331-4351-8c7e-b7dd354fd534/content>. Acesso em: 18 out. 2024.

TIBA, L. G. **Projeto de um sistema de energia solar fotovoltaico para aplicação em residência**. 2013. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2013. Disponível em: <https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariadeControleeAutomacao/galdenoro1906/galdenoro-tcc-luiz-gustavo-tiba-tguniversidade-estadual-paulista-julio-de.pdf>. Acesso em: 18 out. 2024.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; **Meteorologia e climatologia**, Versão Digital 2, Recife, 2006. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/804/o/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf. Acesso em: 28 out. 2024.

VILLALVA, M. **Energia solar fotovoltaica**: conceitos e aplicações. 2 ed. São Paulo: Érica, 2015. 224 p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410**: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16612**: cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kV C.C. entre condutores - requisitos de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

CRESESB. **Radiação solar**. 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301. Acesso em: 20 nov. 2023.

CRITERIA ENERGIA SOLAR. **Tipos de módulos fotovoltaicos**. 2023. Disponível em: <https://criteriaenergia.com.br/modulos-fotovoltaicos-tipos/>. Acesso em: 21 out. 2024.

ENERGÊS. **Do início ao fim sistema solar fotovoltaico off-grid**. 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/do-inicio-ao-fim-sistema-solar-fotovoltaico-off-grid/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

ENERGÊS. **Do início ao fim sistema solar fotovoltaico on-grid**. 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/sistema-solar-on-grid/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

ENERGÊS. **Sol e a radiação solar**. 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/sol-e-a-radiacao-solar/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

FREITAS, L. M. **Estudo da importância e do funcionamento de DPSs em projetos fotovoltaicos**. 2021. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/aec09e7b-ce6d-42eb-863d-a131d3a5910f/content>. Acesso em: 21 nov. 2023.

MINHA CASA SOLAR. **Painel fotovoltaico**: Como é feito um painel solar? 2019. Disponível em: <http://blog.minhacasasolar.com.br/como-e-feito-um-painel-solar/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

PASSOS, A. S. **O uso do sistema fotovoltaico como alternativa energética em residências de médio padrão na cidade de Lagarto (SE)**. 2021. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – UniAGES, Paripiranga, 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/15060/1/TCC%20-%20ALANNA%20DE%20SANTANA%20PASSOS%20O%20USO%20DO%20SISTEMA%20FOTOVOLTAICO%20COMO%20ALTERNATIVA%20ENERG%C3%89TICA%20EM%20RESID%C3%84NCIAS%20DE%20M%C3%89DIO%20PADR%C3%83O%20NA%20CIDADE%20DE%20LAGARTO%20%28SE%29.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2023.

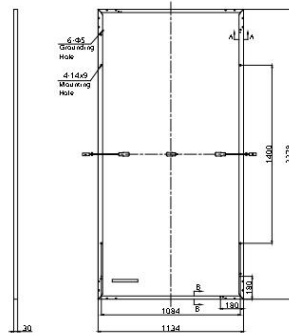
PAULINO, J. O. S. *et al.* **Proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra surtos elétricos em instalações.** Lagoa Santa: Editora Clamper, 2016. Disponível em: <https://clamper.com.br/wp-content/uploads/2023/01/PROTECAO-DE-EQUIPAMENTOS-ELETRICOS-E-ELETRONICOS-CONTRA-SURTOS-ELETRICOS-EM-INSTALACOES-CLAMPER.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2023.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Diretrizes para apresentação de trabalhos acadêmicos da FEG/UNESP.** 2016. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/Biblioteca21/diretrizes-2016.pdf>. Acesso em: 23 dez 2023.

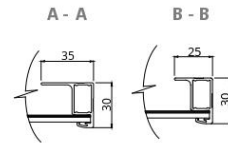
ANEXO A – Folha de dados técnicos módulo fotovoltaico

ENGINEERING DRAWING (mm)

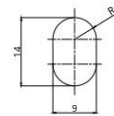
Rear View



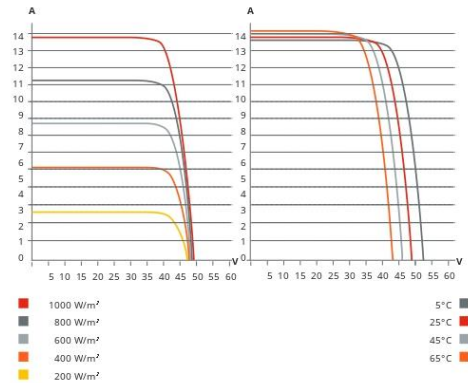
Frame Cross Section



Mounting Hole



CS6W-530MS / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS6W	530MS	535MS	540MS	545MS	550MS	555MS
Nominal Max. Power (Pmax)	530 W	535 W	540 W	545 W	550 W	555 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	40.9 V	41.1 V	41.3 V	41.5 V	41.7 V	41.9 V
Opt. Operating Current (Imp)	12.96 A	13.02 A	13.08 A	13.14 A	13.20 A	13.25 A
Open Circuit Voltage (Voc)	48.8 V	49.0 V	49.2 V	49.4 V	49.6 V	49.8 V
Short Circuit Current (Isc)	13.80 A	13.85 A	13.90 A	13.95 A	14.00 A	14.05 A
Module Efficiency	20.5%	20.7%	20.9%	21.1%	21.3%	21.5%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C					
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)					
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 61730 1500V) or TYPE 2 (UL 61730 1000V) or CLASS C (IEC 61730)					
Max. Series Fuse Rating	25 A					
Application Classification	Class A					
Power Tolerance	0 ~ +10 W					

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

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS6W	530MS	535MS	540MS	545MS	550MS	555MS
Nominal Max. Power (Pmax)	397 W	401 W	405 W	409 W	412 W	416 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	38.3 V	38.5 V	38.7 V	38.9 V	39.1 V	39.3 V
Opt. Operating Current (Imp)	10.38 A	10.42 A	10.47 A	10.52 A	10.55 A	10.59 A
Open Circuit Voltage (Voc)	46.1 V	46.3 V	46.5 V	46.7 V	46.9 V	47.1 V
Short Circuit Current (Isc)	11.13 A	11.17 A	11.21 A	11.25 A	11.29 A	11.33 A

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

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline
Cell Arrangement	144 [2 x (12 x 6)]
Dimensions	2278 x 1134 x 30 mm (89.7 x 44.6 x 1.18 in)
Weight	27.6 kg (60.8 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass with anti-ref-lective coating
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4 mm² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	350 mm (13.8 in) (+) / 250 mm (9.8 in) (-) or customized length*
Connector	T6 or MC4-EVO2 or MC4-EVO2A
Per Pallet	35 pieces
Per Container (40' HQ)	700 pieces or 630 pieces (only for US & Canada)

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

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

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

PARTNER SECTION



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

CSI Solar Co., Ltd.

199 Lushan Road, SND, Suzhou, Jiangsu, China, 215129, www.csisolar.com, support@csisolar.com