

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIZ HENRIQUE ALMEIDA BARBOSA

**ESTUDO E PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
RESIDENCIAL CONECTADO À REDE**

UBERLÂNDIA - MG

2021

LUIZ HENRIQUE ALMEIDA BARBOSA

**ESTUDO E PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
RESIDENCIAL CONECTADO À REDE**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Engenharia Elétrica à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como item obrigatório parcial ao título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho
Gomes

UBERLÂNDIA - MG

2021

LUIZ HENRIQUE ALMEIDA BARBOSA

**ESTUDO E PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
RESIDENCIAL CONECTADO À REDE**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Engenharia Elétrica à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como item obrigatório parcial ao título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Uberlândia, 19 de outubro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes (UFU) (Orientador)

Prof. Dr. Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira (UFU)

Prof. Dr. Arthur Costa de Souza (UNIFEI)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo incentivo e motivação desde o início da graduação.

Aos meus familiares e minha namorada Lorraine pelo apoio e companheirismo.

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Ao professor Luciano Coutinho Gomes pela orientação, disposição e incentivo na concretização desse projeto.

Aos professores que se dispuseram a participar da banca examinadora.

A todos que contribuíram de alguma forma para minha formação.

RESUMO

A energia solar é uma fonte de energia gratuita, limpa e inesgotável que está disponível para uso de geração de energia em grandes quantidades. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo acerca da geração de energia fotovoltaica, aspectos normativos e funcionamento dos componentes principais do sistema, como os módulos, controladores, inversores e elementos de proteção. Além disso, visa-se analisar o perfil de consumo de uma unidade consumidora do município de Uberlândia (MG) e propor um sistema de geração fotovoltaico adequado às suas necessidades, em que será desenvolvido o projeto, dimensionamento, estudo de viabilidade, estimativa financeira de gastos e prazo de retorno do investimento a ser realizado.

Palavras Chave: Energia fotovoltaica. Geração de energia. Conexão à rede.

ABSTRACT

Solar energy is a free, clean and inexhaustible energy source that is available for power generation use in large quantities. In this sense, the objective of this work is to carry out a study about the generation of photovoltaic energy, normative aspects and operation of the main components of the system, such as modules, controllers, inverters and protection elements. In addition, it aims to analyze the consumption profile of a consumer unit in the municipality of Uberlândia (MG) and propose a photovoltaic generation system suited to its needs, in which the project, dimensioning, feasibility study, financial estimate of expenses and time for return on investment to be made.

Keywords: Solar system. Photovoltaic energy. Power generation. Grid connection

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética brasileira	15
Figura 2 – Átomos de silício	18
Figura 3 – Funcionamento de uma célula fotovoltaica	19
Figura 4 – Célula de silício monocristalino	21
Figura 5 – Célula de silício policristalino	21
Figura 6 – Curvas de características I x V e P x V típicas	23
Figura 7 – Influência da irradiância solar na operação do módulo	24
Figura 8 – Influência da temperatura na operação do módulo	25
Figura 9 – Conexão de módulos em série.....	26
Figura 10 – Conexão de módulos em paralelo.....	26
Figura 11 – Funcionamento do inversor.....	27
Figura 12 – Conexão da String Box	31
Figura 13 – Representação de um sistema Off-grid ou autônomo	32
Figura 14 – Representação de um sistema On-grid ou conectado à rede	32
Figura 15 – Visão frontal da residência em estudo	33
Figura 16 – Visão aérea da residência em estudo	34
Figura 17 – Gráfico do consumo de energia residencial	35
Figura 18 – Gráfico da irradiação solar média diária no plano inclinado	36
Figura 19 – Especificações elétricas do modulo	43
Figura 20 – Especificações elétricas do inversor	46
Figura 21 - Especificações da chave seccionadora	50
Figura 22 – Especificações do condutor CC	51
Figura 23 – Especificações do Disjuntor CC	53
Figura 24 – Especificações do Disjuntor CA	53
Figura 25 – Especificações do DPS CC.....	54
Figura 26 – Especificações do DPS CA.....	55
Figura 27 – Suporte para os módulos	56
Figura 28 – Gráfico do fluxo de caixa em função dos anos decorridos	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento do consumo de energia residencial	34
Tabela 2 – Irradiação solar média diária no plano horizontal	36
Tabela 3 – Irradiação solar media no plano inclinado	36
Tabela 4 – Custo de disponibilidade de energia	38
Tabela 5 – Comparação dos módulos da fabricante Amerisolar	41
Tabela 6 – Comparação dos módulos da fabricante Canadian Solar	41
Tabela 7 – Comparação dos módulos da fabricante JA Solar.....	42
Tabela 8 – Comparação dos módulos da fabricante Jinko Solar	42
Tabela 9 – Comparação dos módulos da fabricante Yingli Solar	43
Tabela 10 – Comparação dos inversores.....	46
Tabela 11 – Orçamento.....	58
Tabela 12 – Despesa total com sistema fotovoltaico	59
Tabela 13 – Valor tarifa energia com impostos	60
Tabela 14 – Fluxo de caixa ao longo de 25 anos de produção de energia	61
Tabela 15 – Rentabilidades de investimentos em 2020	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
AIE – Agência Internacional de Energia
ANEEL – Agência Nacional de Engenharia Elétrica
BEN – Balanço Energético Nacional
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CEPEL - Centro de pesquisas em energia elétrica
CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
COP – Conferência de Paris sobre Mudanças Climáticas de 2015
DPS – Dispositivo de Proteção Contra Surtos
DSV – Dispositivo de seccionamento visível
EPE – Empresa de Pesquisa Energética do Ministério de Minas e Energia
FDI – Fator de Dimensionamento de Inversores
HSP – Horas de Sol Pleno
ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadoria e Serviços
IEC – *International Electrotechnical Commission*
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia
IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
ISA – *International Solar Alliance*
LED – *Light-Emitting Diode*
MPPT – *Maximum Power Point Tracking*
MW – Mega-Watt
MWp – Mega-Watt pico
MWh – Mega-Watt Hora
Nm – Número de módulos
NOCT – *Nominal Operating Cell Temperature*

PE – Proteção (Terra)

Pfv – Potência de pico do painel

PR – *Performance Ratio*

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica

PVC – Policloreto de Polivinila

PWM – Modulação por largura de pulso

REN – Resolução Normativa

PRI – Prazo de retorno do investimento

SFA – Sistema Fotovoltaico Autônomo

STC – *Standard Test Conditions*

TD – Taxa de desempenho

UC – Unidade Consumidora

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

USP – Universidade de São Paulo

XLPE – Polietileno reticulado

YF – *Final Yield*

°C – Celsius

a.a. – Ao ano

[A] – ampère

[GW] – Giga-Watt

[GWh] – Giga-Watt hora

[kW] – Kilo-Watt

[kWp] – Quilo-Watt pico

[kWh/m²] – Quilo-Watt Hora por Metro Quadrado

[V] – volts

[W] – Watts

[Wp] – Watt pico

[W/m²] – Watt por Metro Quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA	16
3	OBJETIVOS	17
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
4.1	EFEITO FOTOVOLTAICO	18
4.2	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	20
4.2.1	SILÍCIO MONOCRISTALINO	20
4.2.2	SILÍCIO POLICRISTALINO	21
4.2.3	SILÍCIO AMORFO	22
4.3	COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	22
4.3.1	MÓDULOS	22
4.3.1.1	<i>Características elétricas</i>	22
4.3.1.2	<i>Fatores que afetam o funcionamento dos módulos</i>	24
4.3.1.3	<i>Associações de módulos</i>	25
4.3.1.4	<i>Conexão em série</i>	25
4.3.1.5	<i>Conexão em paralelo</i>	26
4.3.2	INVERSOR	26
4.3.3	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	28
4.3.3.1	<i>Diodos</i>	28
4.3.3.2	<i>DPS</i>	29
4.3.3.3	<i>Chaves</i>	29
4.3.3.4	<i>Condutores</i>	29
4.3.3.5	<i>Fusíveis e Disjuntores</i>	30
4.3.3.6	<i>String Box</i>	30
4.4	CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	31
4.4.1	SISTEMAS <i>OFF-GRID</i>	31
4.4.2	SISTEMAS <i>ON-GRID</i>	32
5	PROJETO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE	33
5.1	LOCALIZAÇÃO	33

5.2	LEVANTAMENTO DO CONSUMO DA RESIDÊNCIA	34
5.3	ANÁLISE DA IRRADIAÇÃO SOLAR.....	35
5.4	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	37
5.4.1	ESCOLHA DOS MÓDULOS.....	39
5.4.2	ESCOLHA DO INVERSOR	44
5.4.3	ARRANJO DOS MÓDULOS.....	47
5.4.4	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E CONDUTORES	50
5.4.4.1	<i>Chave seccionadora</i>	50
5.4.4.2	<i>Condutores</i>	50
5.4.4.3	<i>Diodos e fusíveis</i>	52
5.4.4.4	<i>Disjuntores</i>	52
5.4.4.5	<i>DPS</i>	54
5.4.4.6	<i>Suporte para os módulos</i>	55
6	ANÁLISE FINANCEIRA.....	56
6.1	ENERGIA GERADA	56
6.2	INVESTIMENTO INICIAL.....	57
6.3	CUSTOS DE MANUTENÇÃO	58
6.4	FLUXO DE CAIXA.....	59
6.5	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO	63
6.6	RETORNO DO INVESTIMENTO	65
6.7	VIABILIDADE ECONÔMICA.....	66
7	CONCLUSÃO.....	68
	REFERÊNCIAS.....	70
	ANEXO A – FICHA TÉCNICA MÓDULO FOTOVOLTAICO	75
	ANEXO B – FICHA TÉCNICA INVERSOR.....	77

1 INTRODUÇÃO

A energia fotovoltaica foi inicialmente desenvolvida para aplicações autônomas sem conexão a uma rede elétrica, por exemplo, satélites telecomunicações ou para habitações isoladas. Atualmente, são encontradas em diversas aplicações, como calculadoras, relógios e outros objetos de uso comum. Essa eletricidade produzida por células fotovoltaicas pode alimentar várias cargas contínuas sem dificuldade. No entanto, recentemente, com o surgimento de instalações fotovoltaicas conectadas à rede de distribuição, a energia fotovoltaica experimentou um desenvolvimento significativo como meio de produção eletricidade (CRESESB, 2006).

Esta evolução constante foi possível graças as pesquisas importantes realizadas na área de materiais fotovoltaicos e melhorias nos sistemas de gestão de energia. Ela é uma fonte de energia intermitente, não linear, natural e dependente de muitos parâmetros, como irradiância e temperatura. Portanto, foi necessário adaptar esta fonte energia para o consumo humano, seja armazenando a produção solar em baterias ou em qualquer outro meio de armazenamento em desenvolvimento, seja devolvendo-o na rede pública de eletricidade (CRESESB, 2006).

A energia solar fotovoltaica vem da conversão da luz solar em eletricidade em materiais semicondutores como o silício ou cobertos por uma fina camada de metal. Esses materiais fotossensíveis têm a propriedade de liberar seus elétrons sob a influência de energia externa. Este é o efeito fotovoltaico, um fenômeno físico descoberto por Alexandre Edmont Becquerel em 1839. A energia irradiada pelo sol representaria 40.000 vezes as necessidades de energia que a humanidade consome na forma de combustíveis fósseis. Apesar disso, a energia solar permanece um campo relativamente pequeno explorado (RUTHER, 2004).

Um sistema fotovoltaico é definido pela interligação de módulos entre eles (em série ou em paralelo) para obter alta potência e um conjunto de componentes que adaptam a eletricidade produzida por módulos para atender às necessidades do sistema de condicionamento. A performances desse tipo de geração depende das características do local (luz do sol, temperatura ambiente, obstáculos geográficos, poeira, etc.),

desempenho dos módulos e das características dos outros equipamentos usados (controlador de carga, inversor, bateria, etc.) (RUTHER, 2004).

A eletricidade de painéis fotovoltaicos é produzida com baixa emissão de gases poluentes causadores do efeito estufa, como o gás carbônico. No entanto, essa fonte não é totalmente “limpa” uma vez que ela apresenta um impacto ambiental com emissão de poluentes durante o processo de fabricação dos componentes do sistema fotovoltaico, como dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio (COSTA et al., 2019).

Ela é modular e pode gerar energia em qualquer lugar que exista luz solar. Pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos provaram sua relevância em diversos setores principalmente onde a conexão com a rede local é muito cara ou pouco prática. Tais sistemas, quando acoplados a uma bateria de armazenamento, pode alimentar cargas como rádio, sistemas de controle, repetidores de telefone e sistemas de iluminação (SOLAR, 2019).

Além disso, muitos sistemas fotovoltaicos utilizam a tecnologia MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), também conhecido como seguidor de ponto de máxima potência), um circuito que mede continuamente a tensão e a corrente do sistema para extrair energia dele no ponto de potência máxima. Isso permite a operação do sistema fotovoltaico com o máximo de energia produzida para as condições atmosféricas (temperatura e iluminação) disponíveis (CRESESB, 2006). Ademais, de acordo com a revista *Photon International*, o preço médio dos módulos estão em declínio devido à alta oferta de produção de módulos, não acompanhados pela demanda (ABINEE, 2012).

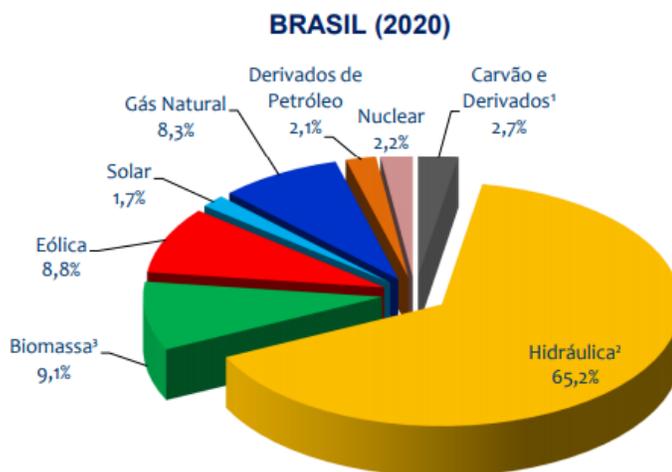
O relatório *Renewables*, realizado pela Agência Internacional de Energia (AIE) em 2019, apontou que a capacidade de produção de energia renovável deveria expandir em 50%, de 2019 a 2024, impulsionada pela energia solar fotovoltaica, que representaria cerca de 60% do crescimento esperado. Este aumento de 1200 Gigawatts seria equivalente à capacidade total de energia instalada dos Estados Unidos atualmente. De acordo com o estudo, o aumento previsto é devido à diminuição de custos e políticas governamentais de apoio (SERODIO, 2019). Nesse sentido, nota-se uma perspectiva de crescimento dessa fonte de geração desde 2019 que pode se concretizar ao final de 2024.

Antes de se equipar com painéis fotovoltaicos, é aconselhável informar-se sobre as condições geográficas em questão. A informação é facilmente encontrada na Internet, por exemplo, a Comunidade Europeia disponibilizou um novo *software* gratuito, *Photovoltaic Geographic Information System*⁷ (OVELHA, 2017). Por meio dele é possível estimar os valores de produtividade energética para diferentes localidades. De acordo com esta ferramenta, em Liège, por exemplo, pode-se obter 833 kWh / kWp / ano, em Hamburgo 846, em Londres 869, em Munique 1000, Madrid 1410, Cannes 1330, Sevilha 1420, Malta 1480 e Faro (Portugal) 1490 kWh / kWp / ano, ou seja, um potencial fator de carga anual variando de 9 a 17%, dependendo no país e na região.

De acordo com uma estimativa teórica da Agência Internacional de Energia (AIE) com base na potência instalada no final de 2020, a energia fotovoltaica pode produzir cerca de 3,7% da eletricidade global no final de 2022 e quase 6% na União Europeia (IEA, 2020).

Segundo o balanço energético nacional referente ao ano de 2020, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética do Ministério de Minas e Energia (EPE), a produção de energia elétrica por meio de energia solar representa 1,7% do total de energia produzida pela matriz energética brasileira, conforme exibido na figura 1. Esses dados demonstram que a contribuição dessa alternativa energética é baixa e possui grande potencial de crescimento no país.

Figura 1 – Matriz energética brasileira



Fonte: EPE, 2020

2 JUSTIFICATIVA

É importante considerar que essa fonte de energia é gratuita, limpa e inesgotável, que pode diminuir a dependência de combustíveis fósseis ou de outras alternativas esgotáveis e poluentes. Uma vez produzida essa eletricidade, ela pode ser fornecida à rede elétrica, em troca de benefícios, em conformidade com as normas e regulamentos nacionais (Pinho; Galdino, 2014).

O silício, o material usado nos painéis solares mais populares da atualidade, é muito abundante e não tóxico. Ademais, os painéis solares têm uma vida útil de 25 a 30 anos e são quase totalmente recicláveis. A modularidade dos painéis é muito importante, ou seja, é possível projetar instalações de vários tamanhos em uma grande variedade de ambientes (OLIVEIRA et al., 2019). Portanto, eles são adequados para a produção descentralizada de eletricidade em locais isolados.

A energia fotovoltaica é uma questão global afirmada pela Conferência de Paris sobre Mudanças Climáticas de 2015 (COP 21) com o lançamento em novembro de 2015 da *International Solar Alliance* (ISA), uma coalizão responsável por coordenar as políticas de desenvolvimento para energia solar térmica e fotovoltaica para Estados ricos em recursos solares (POLITIZE, 2021).

O preço cada vez mais elevado do petróleo, e grau de poluição cada vez mais preocupante, contrastam com as novas disposições para o desenvolvimento sustentável e tornam cada vez mais atrativas as energias alternativas e renováveis. Incentivos econômicos e grandes avanços na tecnologia estão impulsionando o uso de sistemas fotovoltaicos. Soluções simples e vantajosas do ponto de vista econômico, a utilização de dispositivos injetores de energia produzida na rede permite, assim, beneficiar-se de créditos sobre o total de energia produzida. Além disso, a taxa de retorno de energia dos sistemas fotovoltaicos tem melhorado graças aos sucessivos avanços tecnológicos (Pinho; Galdino, 2014).

Além disso, será possível contribuir com o compartilhamento de conteúdo e informação desse tema de forma direcionada para o aprendizado de estudantes e público geral, uma vez que o trabalho trará uma fundamentação teórica bem elaborada e um exemplo de dimensionamento completo de um sistema fotovoltaico do início ao fim,

analisando os aspectos técnicos, econômicos e financeiros. Dessa forma, será possível aumentar o nível de conhecimento e ampliar o interesse das pessoas sobre a temática.

3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar e projetar um sistema de geração fotovoltaico ligado à rede para uma residência de Uberlândia. Este trabalho conterà as seguintes etapas principais: breve revisão da literatura existente, análise do consumo, dimensionamento dos componentes do sistema fotovoltaico e análise de viabilidade. Esse estudo é relevante, uma vez que a utilização da energia solar é uma forma alternativa, sustentável e renovável de energia que contribui para a preservação do meio ambiente e traz diversos benefícios para o consumidor de energia.

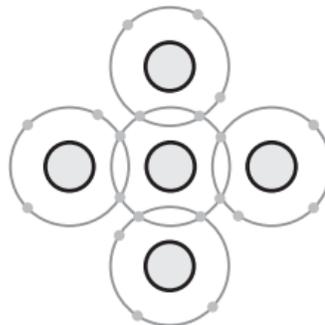
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

Diferentes materiais podem ser utilizados para fabricação das células fotovoltaicas. No entanto, o mais comum é o semicondutor silício, devido ao seu custo e abundância na natureza (Pinho; Galdino, 2014).

O silício possui quatro elétrons de valência e, quando se combinam entre si, formam um sólido cristalino (MALVINO, 2016). Cada átomo faz o compartilhamento de seus quatro elétrons com os átomos vizinhos, passando a existir oito elétrons na sua órbita de valência, conforme exibido na figura 2.

Figura 2 – Átomos de silício



Fonte: MALVINO, 2016

Dessa forma, cada átomo dentro do cristal possui quatro vizinhos e formando ligações químicas covalentes que constituem a estrutura do sólido que forma o cristal. As vibrações dos átomos eventualmente movem os elétrons para longe de seus orbitais de valência. Nesse sentido, os elétrons liberados recebem energia suficiente para se mover para outra órbita localizada mais externamente. Nesta órbita, os elétrons se tornam elétrons livres. Isso cria uma lacuna, que representa um vazio na órbita de valência, que irá atrair e capturar outro elétron nas proximidades. Assim, as lacunas comportam-se como cargas positivas. Porém esse processo não produz uma grande quantidade de elétrons livres, o que exige realizar um processo de dopagem para aumentar a condutividade do material (MALVINO, 2016).

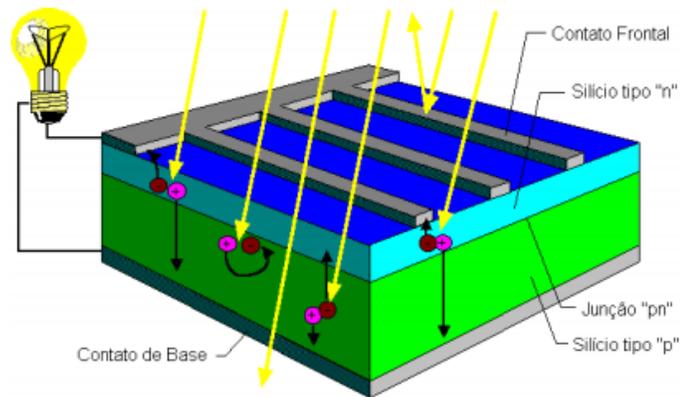
Na sua forma pura, o silício é um semicondutor intrínseco, uma vez que cada átomo do cristal é de silício. Entretanto, ao realizar o processo de dopagem, adicionando átomos de impureza, ele se torna um semicondutor extrínseco. Esse método pode visar o aumento do número de elétrons livres, quando se adiciona um átomo pentavalente, por exemplo fósforo, que irá compartilhar quatro de seus elétrons com os átomos vizinhos de silício, restando um elétron adicional em sua órbita mais externa. Dessa forma, há a formação de elétrons livres (MALVINO, 2016).

Por outro lado, é possível também aumentar o número de lacunas, por meio da adição de átomos trivalentes, que possuem três elétrons na camada de valência, por exemplo o alumínio. Como ele compartilha seus elétrons com as quatro lacunas dos átomos vizinhos de silício ao seu redor, existirá uma lacuna livre na órbita de valência. Desse modo, há a formação de lacunas livres (MALVINO, 2016).

Um semicondutor tipo N foi dopado com impureza pentavalente. Nele, as lacunas são os portadores minoritários e os elétrons são os portadores majoritários, e existe um fluxo de elétrons devido à aplicação de uma tensão. Um semicondutor tipo P foi dopado com impureza trivalente. Nele, os elétrons são os portadores minoritários e as lacunas são os portadores majoritários, e existe um fluxo de lacunas devido à aplicação de uma tensão (MALVINO, 2016).

Quando os dois tipos são colocados em contato, forma-se uma junção semicondutora. Como o material tipo N possui um excesso de elétrons e o tipo P uma carência, os elétrons da camada N movem-se para a camada P, originando um campo elétrico e uma barreira de potencial (MALVINO, 2016).

O efeito fotovoltaico é a geração de uma diferença de potencial devido ao deslocamento de cargas ou corrente através da junção PN, que ocorre por meio da exposição dessa junção à fótons com maior energia que o *gap* (Pinho; Galdino, 2014). Nessa perspectiva, se houver um caminho fechado os elétrons circularão em direção aos eletrodos da camada N, formando uma corrente elétrica, conforme exibido na figura 3.



Fonte: CRESESB, 2006

4.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A célula fotovoltaica é o componente básico do sistema. Ela usa o efeito fotovoltaico para converter as ondas eletromagnéticas (radiação) emitidas pelo Sol em eletricidade. Várias células ligadas entre si formam um módulo solar fotovoltaico que podem ser agrupados entre si em série e paralelo. A eletricidade é consumida ou armazenada no local, ou injetada para a rede de distribuição de energia (RUTHER, 2004).

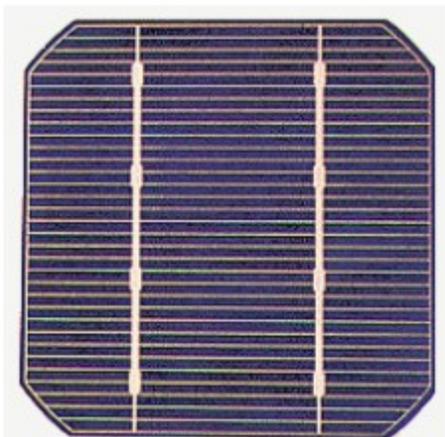
Atualmente, existem diferentes tecnologias para a fabricar células fotovoltaicas. As mais comuns são: silício monocristalino, silício policristalino e silício amorfo.

4.2.1 SILÍCIO MONOCRISTALINO

É usado o método Czochralsk para se formar uma estrutura cristalina homogênea de silício ao longo de todo material. Nesse processo, blocos de silício puro em conjunto com material dopante, frequentemente o boro que é tipo P, são aquecidos em elevadas temperaturas e submetidos à formação do cristal. Elas são as mais utilizadas comercialmente, seu processo produtivo é simples e apresentam boa eficiência entre os diferentes tipos de células, que podem atingir até 24,7%. O silício utilizado deve ter pureza na faixa de 99,9999% (SOLAR, 2020).

Uma célula fotovoltaica monocristalina é exibida na figura 4.

Figura 4 – Célula de silício monocristalino



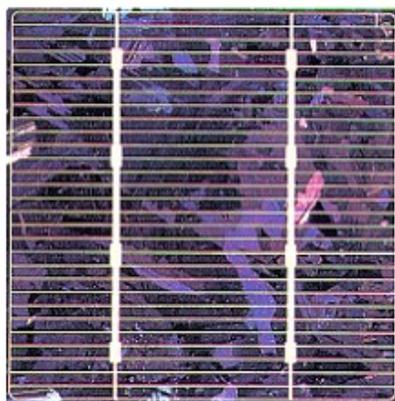
Fonte: CRESESB, 2006

4.2.2 SILÍCIO POLICRISTALINO

Esse material é formado por um aglomerado de pequenos cristais, com diferentes tamanhos e orientações. Nesse processo, o silício é fundido e posteriormente solidificado, resultando em um bloco com um grande número de cristais ou grãos. Essas células possuem eficiência um pouco inferior aos monocristalinos, porém seu custo de fabricação é menor, devido a exigirem um processo de preparação da célula mais simples. Sua eficiência pode atingir até 19,8% (SOLAR, 2020).

Uma célula fotovoltaica policristalina é exibida na figura 5.

Figura 5 – Célula de silício policristalino



Fonte: CRESESB, 2006

4.2.3 SILÍCIO AMORFO

O silício amorfo apresenta uma grande desordem na ligação dos átomos, formando uma estrutura irregular de cristal. Seu processo de fabricação é relativamente simples e barato e foi uma das primeiras tecnologias desenvolvidas. Elas possuem menor custo, porém são pouco utilizadas devido a sua menor eficiência (pode atingir até 15%). Além disso, seus átomos sofrem degradação com a luz e sua eficiência diminui ao longo do tempo (SOLAR, 2020).

4.3 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

4.3.1 MÓDULOS

4.3.1.1 *Características elétricas*

Segundo o CRESESB (2006), as principais características elétricas dos módulos são:

- A tensão de circuito aberto (V_{oc}) é a tensão máxima obtida com os terminais da célula sem carga ou a vazia, sem circulação de corrente;
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}) - máxima corrente obtida com os terminais da célula em curto, com tensão elétrica nula;
- Tensão de máxima potência (V_{mp}) - tensão obtida nos terminais do módulo ao fornecer sua potência máxima;
- Corrente de máxima potência (I_{mp}) - corrente obtida nos terminais do módulo ao fornecer sua potência máxima;
- Máxima potência ou potência de pico (P_{mp}) - potência máxima que o módulo pode fornecer. Esse valor corresponde à multiplicação entre I_{mp} e V_{mp} ;
- Fator de forma (FF) - quociente entre a potência máxima e a multiplicação entre a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto;
- Eficiência (η) - quociente entre a potência elétrica de saída do módulo e a potência de entrada incidente.

O fator de forma e a eficiência podem ser calculados pelas equações 1 e 2 respectivamente.

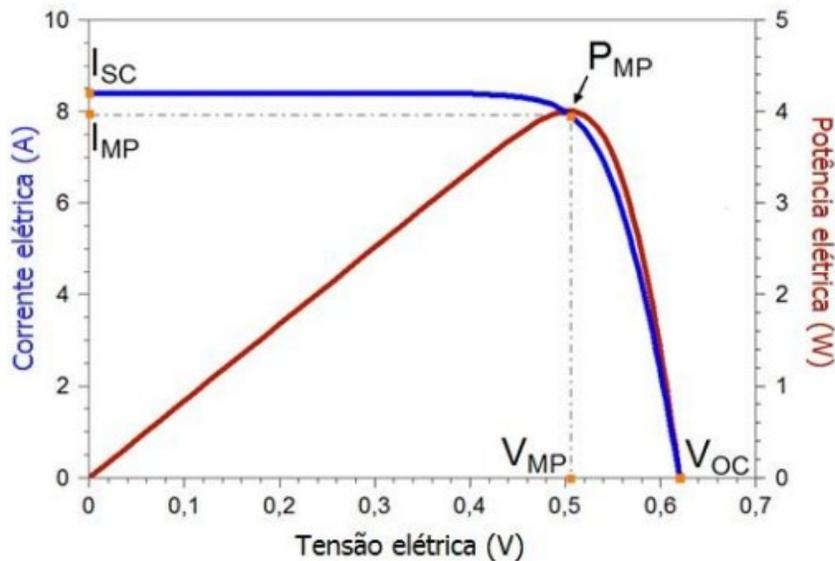
$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{V_o \cdot I_{sc} \cdot FF}{A \cdot G} * 100\% \quad (2)$$

Na equação 2, G (W/m^2) representa a irradiância incidente e A (m^2) representa a área da célula (CRESESB, 2006).

A potência de pico de um módulo fotovoltaico é definida a partir de condições de ensaio que considera uma temperatura de $25^\circ C$, uma irradiância solar de $1000 W/m^2$ e uma distribuição espectral para 1,5 AM (CRESESB, 2006). A partir desse ensaio se obtêm as curvas características das células que compõem os módulos, conforme exibido na figura 6.

Figura 6 – Curvas de características I x V e P x V típicas de uma célula fotovoltaica



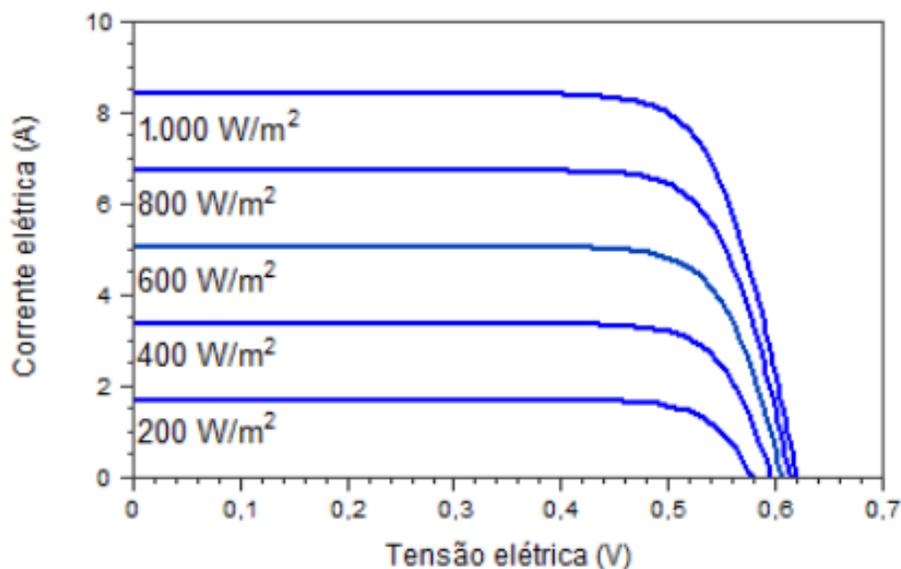
Fonte: CEPTEL-CRESESB, 2014

4.3.1.2 Fatores que afetam o funcionamento dos módulos

O desempenho dos módulos é fortemente influenciado pela temperatura e irradiância solar que geralmente varia ao longo do dia. Com uma irradiância solar de 1000 W/m^2 , o módulo consegue fornecer sua corrente máxima. Porém, como a corrente elétrica é proporcional a irradiação incidente no módulo, com a diminuição da irradiância há uma grande redução da corrente, conforme pode ser observado na figura 7. Esse efeito leva a uma diminuição da potência fornecida (CRESESB, 2006).

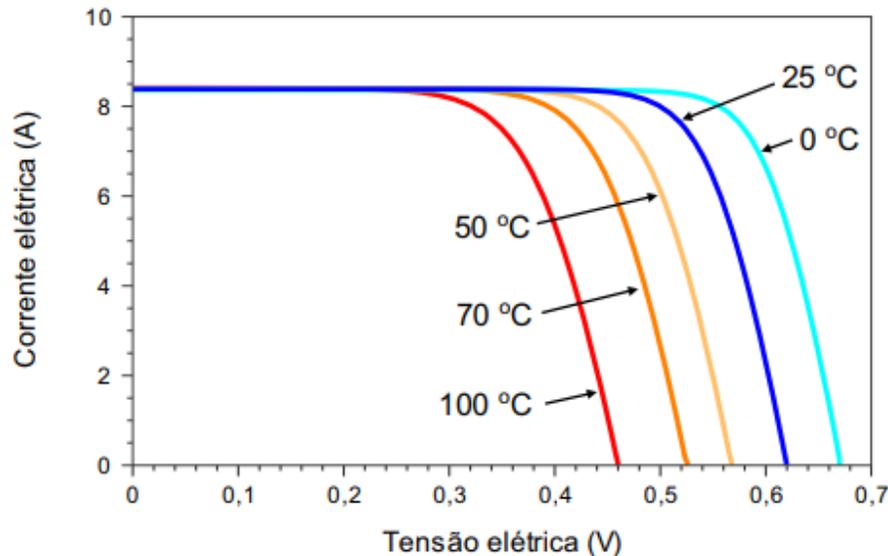
Além disso, a temperatura influencia a tensão que o módulo consegue fornecer em seus terminais. Nesse sentido, ao aumentar a temperatura sobre o módulo, a tensão elétrica diminui, o que leva a diminuição da potência fornecida (CRESESB, 2006). Isso pode ser observado na figura 8.

Figura 7 – Influência da irradiância solar na operação do módulo



Fonte: CEPTEL-CRESESB, 2014

Figura 8 – Influência da temperatura na operação do módulo



Fonte: CEPEL-CRESESB, 2014

4.3.1.3 Associações de módulos

Um módulo fotovoltaico é um conjunto de células fotovoltaicas colocadas em série e, em seguida, encapsulado entre uma placa de vidro na frente e outro material à prova d'água na parte traseira. Dessa forma, as células fotovoltaicas ficam assim protegidas da umidade e das chuvas. Além disso, uma célula sozinha produz uma tensão de apenas 0,5 volts, como pode ser observado na figura 6, o que justifica o agrupamento das células em arranjos série e paralelo de tal forma que possam fornecer uma tensão e potência satisfatórias (RUTHER, 2004).

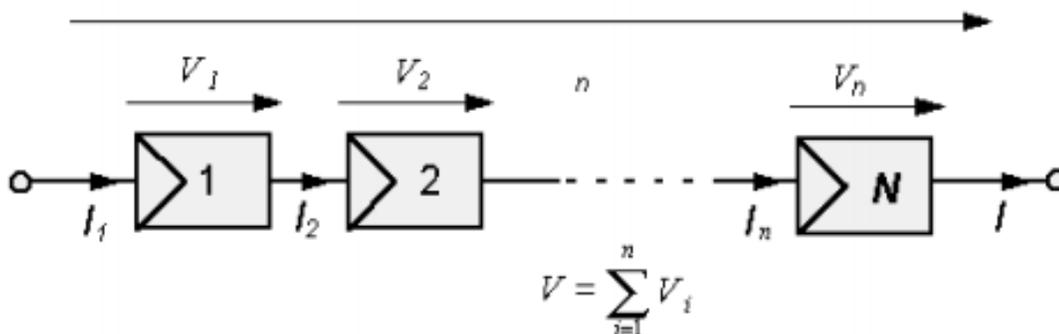
Portanto, para produzir a quantidade de energia desejada, podem ser necessários um grande número de módulos que podem ser conectados em série ou em paralelo, formando um conjunto.

4.3.1.4 Conexão em série

Na associação em série, a tensão de saída total é a soma das tensões fornecidas por cada módulo e a corrente é igual em todos. Cada terminal positivo de um módulo é

ligado ao terminal negativo do próximo em série (RUTHER, 2004). A figura 9 ilustra esse tipo de ligação.

Figura 9 – Conexão de módulos em série

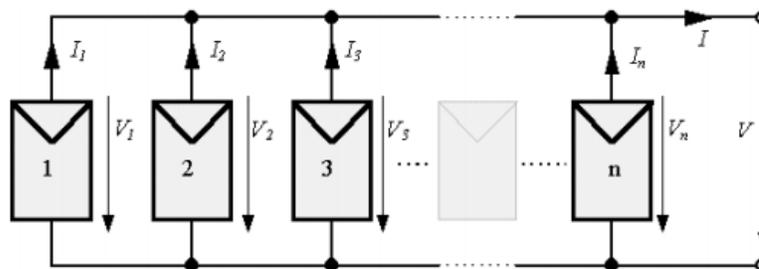


Fonte: CRESESB, 2006

4.3.1.5 Conexão em paralelo

Na associação em paralelo, a corrente de saída total é a soma das correntes fornecidas por cada módulo e a tensão é igual em todos. Todos os terminais positivos dos módulos são interligados entre si e, da mesma forma, os terminais negativos são ligados conjuntamente (RUTHER, 2004). A figura 10 ilustra esse tipo de ligação.

Figura 10 – Conexão de módulos em paralelo

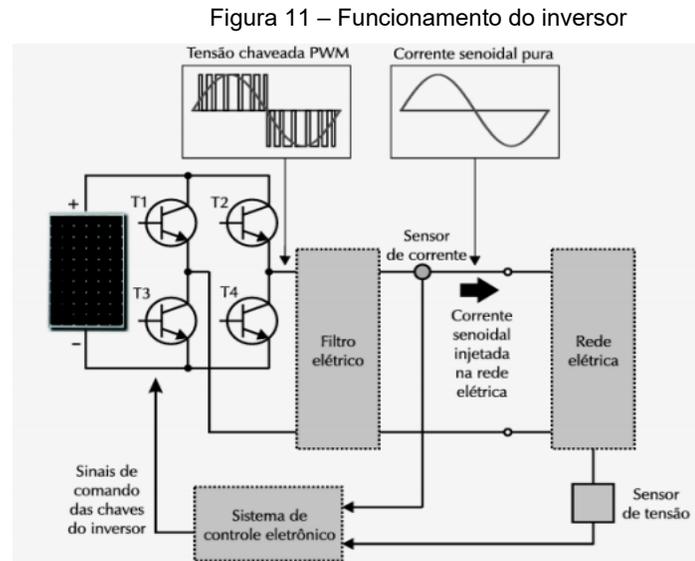


Fonte: CRESESB, 2006

4.3.2 INVERSOR

O inversor é usado para converter corrente contínua fornecida pelos módulos em corrente alternada senoidal para alimentar as cargas por meio de dispositivos de

chaveamento. Ele não opera na ausência da rede elétrica e não fica conectado à instalação em períodos de manutenção ou ausência de fornecimento de energia. Além disso, ele funciona como fonte de corrente e deve ser sincronizado com a tensão senoidal da rede, de forma a operar satisfatoriamente em paralelo com a mesma (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A figura 11 exemplifica o funcionamento do inversor.



Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012

Um dos inversores mais utilizados são os comutados pela própria rede elétrica, que utilizam o sinal da rede para realizar a sincronia. Ele é formado por uma ponte comutada de tiristores e é mais utilizado em grandes sistemas de potências mais elevadas. Caso aconteça um problema na rede, esse inversor desliga de forma automática, o que satisfaz às condições de conexão à rede. Além disso, eles possuem filtros harmônicos de saída, já que eles produzem sinais de onda quadrada com forte taxa de distorção harmônica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Os auto-comutados usam um circuito eletrônico para realizar a sincronia com a rede. Eles operam usando a modulação por largura de pulso (*PWM*), que possibilita um bom controle da tensão de saída. Devido a seu chaveamento rápido, eles conseguem produzir pulsos semelhantes aos de uma onda senoidal. No entanto, produzem interferência eletromagnética em alta frequência, o que exige meios de compatibilizar esses efeitos com as normas existentes a fim de atenuá-los (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

O inversor possui um recurso chamado de MPPT (*maximum power point tracking*) ou rastreador de ponto de máxima potência, uma tecnologia usada para obter elevados rendimentos de operação. Ele observa continuamente os parâmetros elétricos de entrada, faz ajustes em tempo real, o que otimiza a geração de energia por meio do máximo aproveitamento da energia na conversão (CRESESB, 2006).

4.3.3 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

A proteção é essencial para segurança de equipamentos e pessoas, pois ajudam na eliminação de falhas no sistema que podem colocar em risco a instalação elétrica. Os dispositivos de proteção podem estar já incorporados aos equipamentos (nos inversores por exemplo) ou podem ser inseridos externamente (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

No sistema fotovoltaico são geralmente utilizadas chaves, fusíveis, disjuntores e dispositivos de proteção contra surtos para fins de proteção. Eles são dimensionados em função dos valores máximos permitidos de tensão e corrente em cada trecho do circuito (ASSAIFE, 2013).

Deve-se levar em consideração se o dispositivo irá operar com tensão contínua ou alternada no local de sua instalação. Por exemplo, entre o módulo e o controlador de carga ou inversor circula corrente contínua. Por outro lado, entre o inversor e a rede circula corrente alternada. Eles funcionam adequadamente com o tipo de tensão contínua ou alternada projetados para operação. Caso isso não seja respeitado, os equipamentos de proteção podem apresentar problemas, como mal funcionamento ou perda da vida útil. Nesta seção utilizou-se, principalmente, as orientações em conformidade com VILLALVA e GAZOLI (2012).

4.3.3.1 Diodos

Os diodos de bloqueio são utilizados para evitar fluxo de corrente entre bateria e módulo ou entre dois ou mais grupos de módulos em paralelo. Eles geralmente são dispensáveis, uma vez que o fusível pode realizar sua função com uma menor probabilidade de falhas. Porém, quando utilizados, os diodos de bloqueio devem ter a

capacidade de suportar o dobro da tensão de circuito aberto do conjunto (ASSAIFE, 2013).

Por outro lado, os diodos de desvio ou by-pass são usados em paralelo com os módulos a fim de inibir que um módulo em mau funcionamento devido a um sombreamento ou defeito afete o conjunto total do sistema de geração. Frequentemente, eles são incorporados ao módulo e já vem disponíveis ao adquirir o módulo (ASSAIFE, 2013).

4.3.3.2 *DPS*

Os dispositivos de proteção contra surtos (DPS) são essenciais para limitar sobretensões e desviar altas correntes de surtos elétricos provocados por descargas atmosféricas, que podem danificar um equipamento ou incendiá-lo quando não protegido. Seu custo relativo é menor quando comparado com um módulo ou inversor que poderia apresentar esses danos na ocorrência de um surto (ASSAIFE, 2013). Dessa forma, esse item é indispensável para a segurança das instalações elétricas, pessoas e equipamentos.

Ademais, a norma IEC 60364 recomenda o uso de DPS Classe II nos sistemas fotovoltaicos.

4.3.3.3 *Chaves*

Uma chave seccionadora sob carga ou dispositivo de seccionamento visível (DSV) é obrigatório após o medidor para desconectar a geração fotovoltaica a fim de realizar procedimentos de manutenção de rede (ANEEL, 2012).

4.3.3.4 *Condutores*

Segundo a NBR 16690, o condutor de circuitos de corrente contínua de sistemas fotovoltaicos deve ser próprio para essa aplicação, de cobre estanhado, não propagantes de chama, não halogenado, possuir dupla isolamento, resistente a água e ter proteção contra radiação ultravioleta se expostos a tempo.

Para a conexão de sistemas fotovoltaicos a rede, os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 5410:2004 – “Instalações Elétricas de Baixa Tensão” – devem ser considerados. Assim, os condutores podem ser dimensionados usando os critérios de capacidade de condução de corrente, queda de tensão ou seção mínima para o lado de corrente alternada.

Deve-se usar condutores específicos para aplicações fotovoltaicas para o lado de corrente contínua. No dimensionamento dos condutores, é importante considerar uma isolação com proteção contra radiação ultravioleta para cabeamento aparente capaz de suportar temperaturas extremas. Também podem ser utilizados os critérios de capacidade de condução de corrente, queda de tensão e seção mínima (ASSAIFE, 2013).

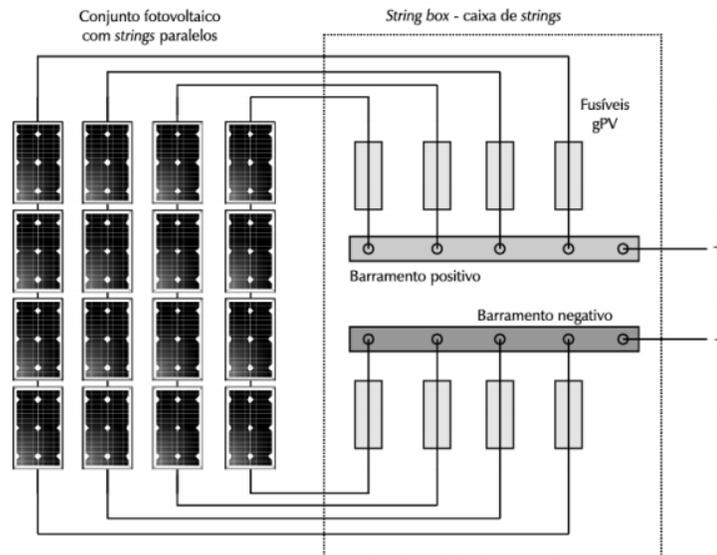
4.3.3.5 Fusíveis e Disjuntores

O fusível ou o disjuntor tem a função de proteger os cabos, equipamentos, e demais componentes no caso de sobrecorrentes ocasionadas por uma sobrecarga, falha na isolação ou curto-circuito. Não raro, os instaladores de sistemas fotovoltaicos dão preferência para utilização de disjuntores em vez de fusíveis, uma vez que estes devem ser substituídos quando atuam na proteção (ASSAIFE, 2013).

De acordo com a norma IEC 60364, não é preciso utilizar fusíveis em conjuntos fotovoltaicos com até dois *strings* em paralelo. Acima disso, é obrigatório para proteger em situação de corrente reversa dos módulos.

4.3.3.6 String Box

A *string box* ou caixa de junção é uma caixa de conexões que interliga os dispositivos de proteção no lado de corrente contínua e conecta os cabos elétricos vindos dos painéis. Entre os principais elementos de proteção estão os fusíveis, diodos de bloqueio, dispositivos de proteção contra surtos CC e interruptor CC (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A figura 12 ilustra a conexão da caixa de *strings* com os módulos.

Figura 12 – Conexão da *String Box*

Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012

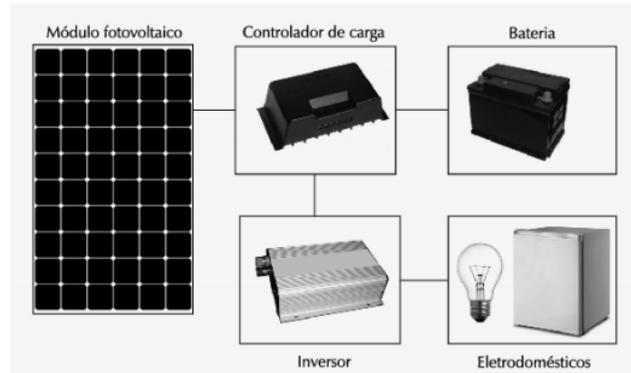
A *string box* pode ser adquirida pronta com o fabricante ou montada pelo projetista do sistema fotovoltaico. Ela possui, geralmente, os terminais para conectar os cabos com os conectores padrão e pode ser utilizada para armazenar os equipamentos de proteção tanto do lado CC quanto do lado CA (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

4.4 CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

4.4.1 SISTEMAS *OFF-GRID*

Os sistemas fotovoltaicos *Off-grid* ou isolados são utilizados em áreas não atendidas por redes de energia elétrica. Eles são muito usados para fornecer energia para áreas rurais, no camping e ilhas, onde o fornecimento de energia por meio da concessionária é indisponível. Geralmente, eles necessitam de meios para armazenamento de energia para utilização quando a irradiação solar é insuficiente para suprir a demanda das cargas. Para isso, usa banco de baterias em conjunto com controladores de carga e um inversor CC-CA (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A figura 13 exemplifica a organização de um sistema isolado.

Figura 13 – Representação de um sistema *Off-grid* ou autônomo



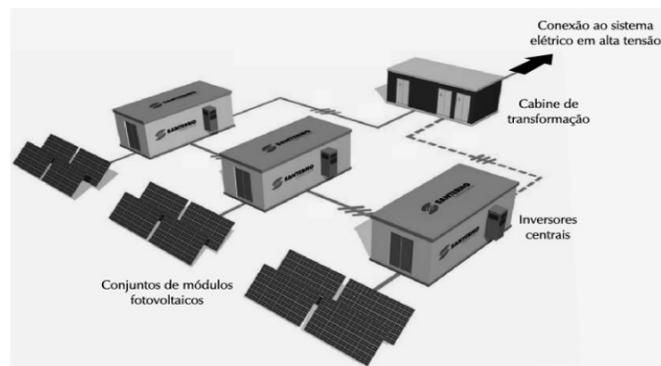
Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012

4.4.2 SISTEMAS ON-GRID

Os sistemas fotovoltaicos *On-grid* ou conectados à rede são utilizados em áreas atendidas por redes de energia elétrica. Eles operam em paralelo com a rede pública de energia e geram eletricidade para o utilização do consumidor, podendo diminuir o consumo da rede pública ou gerar excedentes criando um saldo positivo em forma de créditos junto à concessionária (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Nesse sentido, esses sistemas não necessitam de armazenamento de energia, baterias e controladores de carga, uma vez que a geração é entregue diretamente à rede. No entanto, precisam de inversores CC-CA que satisfaça os requisitos de qualidade da energia elétrica da rede (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A figura 14 exemplifica a organização de um sistema *On-grid*.

Figura 14 – Representação de um sistema *On-grid* ou conectado à rede



Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012

5 PROJETO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico residencial *On-grid*, é necessário analisar a quantidade de energia que se deseja produzir alinhada com a irradiância, demanda solicitada, disponibilidade de área, características dos módulos, recursos financeiros disponíveis e condições do ambiente (CRESESB, 2006). Todas essas questões serão discutidas ao longo do dimensionamento.

Primeiramente, vale destacar que o projeto foi realizado para fins de estudos acadêmicos e foram utilizadas informações de uma unidade consumidora com a permissão do proprietário do imóvel, que tem um interesse em realizar o investimento no sistema fotovoltaico. Desse modo, serão realizados os cálculos de dimensionamento para atender o consumo de energia médio mensal da residência e no final será verificado o recurso financeiro necessário, o tempo do retorno do investimento e a rentabilidade que poderia se obter com esse investimento ao longo do tempo. Dessa forma, será possível avaliar a viabilidade econômica e financeira de execução do projeto.

5.1 LOCALIZAÇÃO

A residência onde será realizado esse estudo situa-se no endereço rua Charqueada, 160, bairro Granada, Uberlândia – MG. Será dimensionado um sistema fotovoltaico conectado à rede para essa unidade consumidora que é alimentada em baixa tensão. Sua coordenada de latitude é: 18.9482 Sul, e longitude: 48.2451 Oeste. A figura 15 exibe a vista frontal da casa.

Figura 15 – Visão frontal da residência em estudo



Fonte: Google Maps, 2021

A residência tem um telhado feito com telhas de cimento, portanto o suporte para os módulos deverá ser adaptado para essa situação. Ela possui residências vizinhas, porém não há riscos de sombreamento dos painéis ao longo da maior parte do dia. A figura 16 exibe a visão aérea da casa.

Figura 16 – Visão aérea da residência em estudo



Fonte: Google Maps, 2021

5.2 LEVANTAMENTO DO CONSUMO DA RESIDÊNCIA

Inicialmente, realiza-se uma análise do consumo de energia dos últimos treze meses da residência, afim de calcular o consumo médio mensal com uma maior precisão. Nessa perspectiva, optou-se por realizar o cálculo para treze meses em vez de doze, porém o acréscimo de um mês não altera significativamente o consumo médio mensal calculado.

Dessa maneira, a tabela 1 e o gráfico exibido na figura 17 mostram os dados do consumo dos meses de junho de 2020 a junho de 2021.

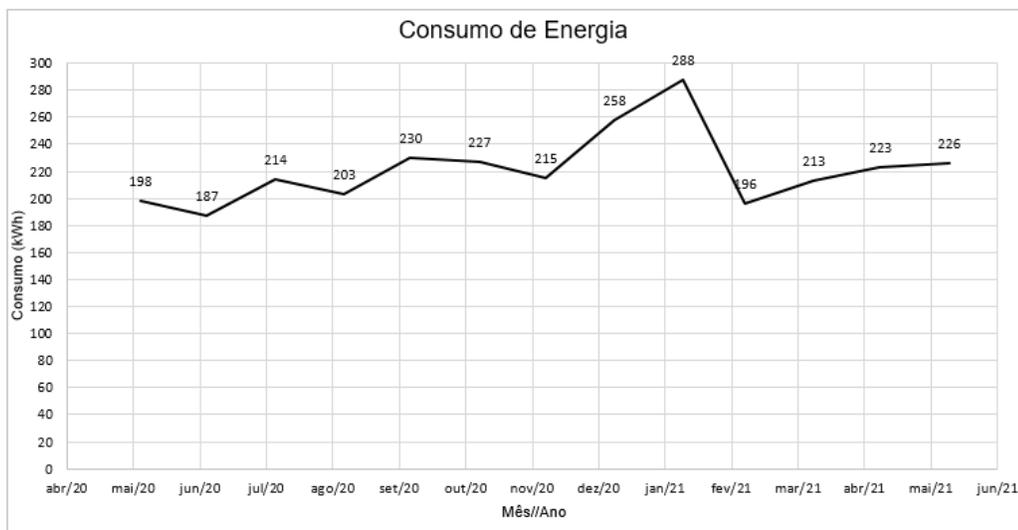
Tabela 1 – Levantamento do consumo de energia residencial

Mês	Consumo (kWh)
Junho/20	198
Julho/20	187
Agosto/20	214
Setembro/20	203
Outubro/20	230
Novembro/20	227
Dezembro/20	215
Janeiro/21	258
Fevereiro/21	288

Março/21	196
Abril/21	213
Maio/21	223
Junho/21	226
Total	3099
Média	221

Fonte: Do Autor, 2021

Figura 17 – Gráfico do consumo de energia residencial



Fonte: Do Autor, 2021

Esses dados foram obtidos das faturas de energia elétrica da unidade consumidora. A partir da média do histórico de consumo de energia nesse período foi possível calcular o consumo médio mensal de 221 kWh/mês da residência.

5.3 ANÁLISE DA IRRADIAÇÃO SOLAR

A irradiação solar, em Wh/m².dia, expressa a energia solar incidente sobre uma área plana por unidade de tempo. Essa informação é de grande valia para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos em geral. É importante salientar que a irradiação é um valor variável que se modifica cada dia do ano devido a influência das estações do ano, da presença de nuvens no céu e da ocorrência de chuvas. Os dados mostrados na tabela 2 referem-se a média mensal de irradiação solar para a cidade de Uberlândia.

Foi utilizado o *software* SunData disponibilizado pelo CRESESB em seu *site* para obter as médias mensais de irradiação solar para a unidade consumidora. Essa ferramenta permite obter os dados de irradiação solar em qualquer lugar do Brasil. Ela utiliza os dados de localidade geográfica latitude e longitude para fornecer os valores médios diários e mensais de energia solar recebida em uma localidade. Com os dados das coordenadas geográficas, obteve-se as tabelas 2 e 3 que mostram os valores de irradiação solar média diária para cada mês do ano em função da inclinação. A partir desses valores gerou-se o gráfico exibido na figura 18.

Tabela 2 – Irradiação solar média diária no plano horizontal

Latitude: 18,9482° S
Longitude: 48,2451° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]													Média	Delta			
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out			Nov	Dez	
✓	Uberlandia	Uberlandia	MG	BRASIL	18,901° S	48,249° O		5,3	5,55	5,85	5,11	5,02	4,51	4,32	4,55	5,47	5,44	5,67	5,59	5,77	5,24	1,53

Fonte: CRESESB, 2021

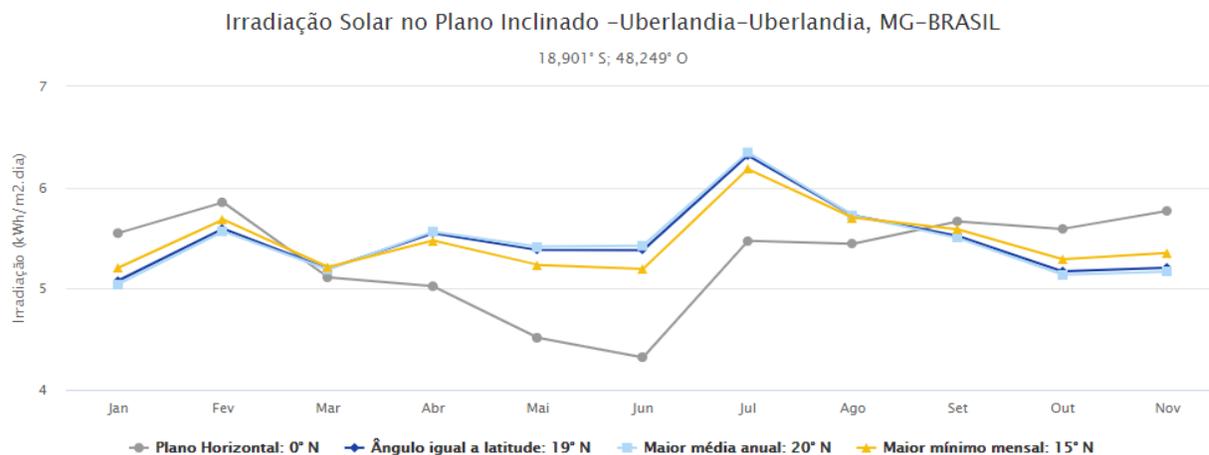
Tabela 3 – Irradiação solar media no plano inclinado

Estação: Uberlandia
Município: Uberlandia , MG - BRASIL
Latitude: 18,901° S
Longitude: 48,249° O
Distância do ponto de ref. (18,9482° S; 48,2451° O):5,3 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,55	5,85	5,11	5,02	4,51	4,32	4,55	5,47	5,44	5,67	5,59	5,77	5,24	1,53
✓	Ângulo igual a latitude	19° N	5,08	5,59	5,20	5,55	5,38	5,38	5,58	6,32	5,72	5,52	5,17	5,21	5,47	1,24
✓	Maior média anual	20° N	5,04	5,57	5,19	5,56	5,42	5,42	5,62	6,35	5,72	5,50	5,14	5,17	5,48	1,30
✓	Maior mínimo mensal	15° N	5,21	5,68	5,21	5,48	5,24	5,19	5,40	6,18	5,70	5,59	5,29	5,35	5,46	,99

Fonte: CRESESB, 2021

Figura 18 – Gráfico da irradiação solar média diária no plano inclinado



Com base nessas informações, encontra-se o valor de irradiação solar diária média mensal de 5,47 kWh / (m²·dia) para o painel com inclinação de 20°N em relação ao plano horizontal, que possui maior média anual. Essa inclinação de 20°N, valor muito próximo da latitude do local, representa a melhor inclinação para melhor aproveitamento da energia solar, uma vez que apresenta a maior média mensal, conforme pode ser observado na tabela 3.

É conveniente desconsiderar os efeitos da variação da irradiação a cada momento e converter o total de energia em intervalos horários de valor acumulado de energia produzida ao longo de um dia, dado pelo número de Horas de Sol Pleno (HSP). Essa variável representa o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante e igual a 1000 W/m².

Dessa forma, a irradiação incidente (I) no plano dos módulos é convertida para seu valor médio diário em kWh / (m²·dia) e depois em HSP.

$$\text{HSP} = \frac{I \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right)}{1 \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right)} \quad (3)$$

$$\text{HSP} = \frac{5,47}{1} = 5,47 \text{ h} \quad (4)$$

Com base no valor de irradiação solar diária média mensal de 5,47 kWh / m², tem-se então que o número de horas de sol pleno é 5,47 horas ou 5 horas e 28 minutos, conforme calculado acima.

5.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Para dimensionar a potência do sistema fotovoltaico, é primordial compreender o sistema de compensação de energia elétrica em regulamentação no país, chamado “*net metering*”. Ele permite gerar créditos em kWh sempre que a geração de energia total é maior que o consumo total no mês. Dessa forma, há uma energia excedente que é registrada pelo medidor e fornecida à rede, ficando disponível para o consumidor em

forma de créditos a serem consumidos nas próximas faturas de energia por um prazo até 5 anos.

É conveniente, portanto, que seja gerada apenas a energia a ser consumida pela unidade consumidora diminuído do valor de taxas mínimas de energia que são cobradas pela distribuidora, o que será explicado em seguida.

Com base na tabela 1, o consumo médio mensal foi de 221 kWh. É válido destacar que há a cobrança de uma tarifa mínima sobre o uso da energia elétrica chamada de custo de disponibilidade do sistema elétrico para unidades consumidoras. Conforme art. 98. da resolução 414 da ANEEL, o custo de disponibilidade aplicável ao faturamento mensal de consumidor responsável por unidade consumidora do grupo B, é o valor em moeda corrente equivalente aos valores exibidos na tabela 4.

Tabela 4 – Custo de disponibilidade de energia

Classe	Custo de Disponibilidade (kWh)
Monofásico	30
Bifásico	50
Trifásico	100

Fonte: ANEEL, 2010

A residência analisada pertence à classe residencial bifásico, o custo de disponibilidade será de 50 kWh. Como esse valor é uma taxa mínima, ele deve ser subtraído do consumo, a fim de não ser gerado essa quantidade de energia que o consumidor terá que pagar obrigatoriamente, mesmo se não a consumir. Portanto, a energia a ser gerada será:

$$\text{Energia} = \text{Consumo} - \text{Disponibilidade} \quad (5)$$

$$\text{Energia} = 221 - 50 = 171 \text{ kWh/mês} \quad (6)$$

$$\text{Energia} = 171 / 30 = 5,7 \text{ kWh/dia} \quad (7)$$

Assim, pode-se calcular a potência do microgerador pela equação 8 abaixo:

$$P_{fv} = \frac{E}{\frac{TD}{HSP}} \quad (8)$$

Onde:

- P_{fv} (Wp) – Potência de pico do painel
- E (Wh/dia) – Consumo diário médio
- HSP (h) – Horas de sol pleno
- TD – Taxa de desempenho

A taxa de desempenho é a relação entre o desempenho real e o máximo teórico possível pelo sistema. Conforme Pinho e Galdino (2014), a TD está entre 70 e 80% para sistemas residenciais não sombreados e bem ventilados. Esse valor considera a potência real do sistema em condições de operação e todas as perdas envolvidas, como perdas por queda de tensão devido à resistência de conectores e cabeamento, sujeira na superfície do painel, sombreamento, eficiência e carregamento do inversor, entre outras. Neste projeto, escolheu-se um TD de 75%.

Assim, pode-se calcular a potência do microgerador do sistema fotovoltaico pela equação 9:

$$P = \frac{5,7}{\frac{0,75}{5,47}} = 1,3893 \text{ kW} \quad (9)$$

5.4.1 ESCOLHA DOS MÓDULOS

Após isso, deve-se avaliar qual melhor tecnologia atende ao projeto, considerando o custo da energia gerada, as vantagens arquitetônicas e elétricas de cada uma. Além disso, é importante observar a credibilidade da empresa no mercado quanto à garantia dos módulos e características do produto.

A fim de encontrar qual melhor módulo para o projeto, deve-se considerar todos esses aspectos. Porém, o mais importante é o preço, pois ele define o custo inicial do consumidor com o sistema fotovoltaico e afeta diretamente o prazo de retorno do investimento. Essa variável deve estar alinhada com as necessidades do consumidor e

o valor disponível para a compra do mesmo. Além disso, ele depende do número de módulos necessários para suprir a demanda ou consumo.

Dessa forma, é possível encontrar a quantidade de módulos mínimo a serem utilizados por meio da equação abaixo, que relaciona a potência total dos painéis calculada anteriormente e a potência de um módulo dado pelo *datasheet* de cada fabricante.

$$N_m = \frac{P_{fv}}{P_m} = \frac{1389,396}{P_m} \quad (10)$$

A partir disso, utilizando o preço comercial de um módulo consegue-se encontrar o preço total dos módulos multiplicando o valor unitário pelo número de módulos mínimo requerido.

Nesse sentido, será feito uma análise das principais marcas e modelos de módulos fotovoltaicos comercializados no mercado brasileiro. Assim, foram escolhidas 5 marcas que são referências, segundo JESUS(2020), no Brasil e no exterior nesse ramo: American Solar, Canadian Solar, JA solar, Jinko Solar, Yingli Solar.

Assim, busca-se relacionar a potência máxima, a eficiência, o número de módulos, o preço unitário, o preço por Watt-pico e o preço total dos módulos para diferentes modelos de cada fabricante a fim de compará-las e observar qual delas possui o melhor custo-benefício para o projeto.

Todas essas informações são exibidas nas tabelas de 5 a 9 para cada marca analisada. O modelo, tipo da célula, eficiência, dimensões e potência foram encontrados a partir do *datasheet* de cada fabricante. O número de módulos é dado pela equação acima. E os preços unitários dos módulos foram obtidos por meio de consultas nos seguintes *sites* de vendas de painéis solares: MERCADOLIVRE(2021), ENERGIATOTAL (2021) e ENERGYSHOP (2021).

Tabela 5 – Comparação dos módulos da fabricante Amerisolar

Modelo	Tipo	Eficiência (%)	Dimensões do Módulo (mm)	Potência (Wp)	Nº de Módulos	Preço Unitário(R\$)	Preço total(R\$)	Preço por Wp(R\$)
AS 285P	Policristalino	17,52	1640 x 992 x 35	285	5	679,00	3395	11,91
AS-6P	Policristalino	17,52	1956 x 992 x 40	330	4	942,00	3768	11,42
AS 340W AS-6M- HCB	Policristalino	17,52	1956X 992 X 35	340	4	815,00	3260	9,59
AS-6M- HCB 400	Monocristalino	19,86	2000X 1000 X 35	400	4	1090,00	4360	10,90

Fonte: AMERISOLAR, 2021

Tabela 6 – Comparação dos módulos da fabricante Canadian Solar

Modelo	Tipo	Eficiência (%)	Dimensões do Módulo (mm)	Potência (Wp)	Nº de Módulos	Preço Unitário(R\$)	Preço total(R\$)	Preço por Wp(R\$)
CS6K- 270P	Policristalino	16,5	1650 x 992 x 40	270	5	890,00	4450	16,48
CS3U- 365P	Policristalino	18,4	2000 x 992 x 35	365	4	450,00	1800	4,93
CS3W- 445MS	Monocristalino	20,14	2108 x 1048 x 40	445	3	400,00	1200	2,70
CS3Y- 490MS	Monocristalino	20,76	2252 x 1048 x 35	490	3	539,00	1617	3,30
CS6W- 535MS	Monocristalino	20,87	2261 x 1134 x 35	535	3	400,00	1200	2,24

Fonte: CANADIANSOLAR, 2021

Tabela 7 – Comparação dos módulos da fabricante JA Solar

Modelo	Tipo	Eficiência (%)	Dimensões do Módulo (mm)	Potência (Wp)	Nº de Módulos	Preço Unitário(R\$)	Preço total(R\$)	Preço por Wp(R\$)
JAM6(K)-72-335/PR	Policristalino	17,28	1956 x 991 x 45	335	4	699,00	2796	8,35
JAM-410W - Mono	Monocristalino	20,4	2015 x 996 x 40	410	4	1049,00	4196	10,23
JAM-450W - Mono	Monocristalino	20,2	2120 x 1052 x 40	450	3	1059,00	3177	7,06

Fonte: JASOLAR, 2021

Tabela 8 – Comparação dos módulos da fabricante Jinko Solar

Modelo	Tipo	Eficiência (%)	Dimensões do Módulo (mm)	Potência (Wp)	Nº de Módulos	Preço Unitário(R\$)	Preço total(R\$)	Preço por Wp(R\$)
JKM265PP-60	Policristalino	16,19	1650 x 992 x 40	265	5	599,00	2995	11,30
340W - Half Cell	Policristalino	18,4	1987 x 992 x 30	340	4	1123,50	4494	13,22
JKM400M-72H-V	Monocristalino	19,88	2008 x 1002 x 30	400	4	1069,00	4276	10,69
Jkm410m-72h-mbb-bdvp	Monocristalino	20,03	2031 x 1008 x 30	410	4	1150,00	4600	11,22
Jkm450m-60hl4-v 60m H	Monocristalino	20,85	1903 x 1134 x 30	450	3	1099,00	3297	7,33

Fonte: JINKOSOLAR, 2021

Tabela 9 – Comparação dos módulos da fabricante Yingli Solar

Modelo	Tipo	Eficiência (%)	Dimensões do Módulo (mm)	Potência (Wp)	Nº de Módulos	Preço Unitário(R\$)	Preço total(R\$)	Preço por Wp(R\$)
YL150P-17b	Policristalino	15	1470 x 680 x 35	150	10	538	5380	35,87
YL160P	Policristalino	15	1470 x 680 x 25	160	9	540,00	4860	30,38
YL280P	Policristalino	17,1	1650 x 992 x 35	280	5	710,00	3550	12,68
YLM400M	Monocristalino	18,4	2015 x 999 x 35	400	4	930,00	3720	9,30

Fonte: YINGLISOLAR, 2021

Escolheu-se o módulo solar do modelo CS6W-535MS (535Wp) fabricado pela Canadian Solar, cujas especificações estão na figura 19, uma vez que ele apresentou o melhor custo-benefício. Considerou-se nessa escolha a potência, a eficiência, o preço final, o preço por watt-pico, a garantia do fabricante, a certificação de qualidade nacional e a internacional. Esse painel possui o selo do INMETRO e certificação de qualidade IEC 61215.

Figura 19 – Especificações elétricas do módulo

ELECTRICAL DATA STC*						
CS6W	525MS	530MS	535MS	540MS	545MS	550MS
Nominal Max. Power (Pmax)	525 W	530 W	535 W	540 W	545 W	550 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	40.7 V	40.9 V	41.1 V	41.3 V	41.5 V	41.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	12.90 A	12.96 A	13.02 A	13.08 A	13.14 A	13.20 A
Open Circuit Voltage (Voc)	48.6 V	48.8 V	49.0 V	49.2 V	49.4 V	49.6 V
Short Circuit Current (Isc)	13.75 A	13.80 A	13.85 A	13.90 A	13.95 A	14.00 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/m ² , spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.						
ELECTRICAL DATA NMOT*						
CS6W	525MS	530MS	535MS	540MS	545MS	550MS
Nominal Max. Power (Pmax)	392 W	396 W	400 W	403 W	407 W	411 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	38.0 V	38.2 V	38.4 V	38.6 V	38.8 V	39.0 V
Opt. Operating Current (Imp)	10.33 A	10.37 A	10.42 A	10.45 A	10.49 A	10.54 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.8 V	46.0 V	46.2 V	46.4 V	46.6 V	46.8 V
Short Circuit Current (Isc)	11.09 A	11.13 A	11.17 A	11.21 A	11.25 A	11.30 A
* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m ² , spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.						

Fonte: CanadianSolar, 2021

Pode-se então calcular o número de módulos:

$$N_m = \frac{P_{fv}}{P_m} = \frac{1389,396}{535} = 2,59 \quad (11)$$

Serão necessários, portanto, 3 módulos. Conforme o manual do fabricante, as dimensões do módulo são 2261 x 1134 x 35 mm. Portanto, pode-se calcular a área ocupada por um módulo:

$$A_m = 2,261 * 1,134 = 2,56 \text{ m}^2 \quad (12)$$

Portanto, para determinar a área total ocupada pelos módulos, utiliza-se a área ocupada por um módulo e a quantidade de módulos requerida:

$$A_t = N_m * A_m = 3 * 2,56 = 7,69 \text{ m}^2 \quad (13)$$

Assim, a área total ocupada pelos módulos será de 7,69 m². Vale ressaltar que essa área requerida está em conformidade com as dimensões do telhado da residência, que seguramente comportará os três módulos.

A fim de escolher o arranjo dos módulos, é preciso saber os valores de corrente e tensão de operação do inversor, que deve então ser dimensionado.

A potência instalada correspondente a máxima gerada pode ser calculada pela multiplicação da potência de um módulo e o número de módulos.

$$P_{int} = 535 * 3 = 1605 \text{ W} \quad (14)$$

5.4.2 ESCOLHA DO INVERSOR

Para a escolha do inversor deve-se considerar a potência máxima gerada, as características elétricas dos módulos e topologia da instalação. Além disso, é importante analisar a credibilidade da empresa, a garantia do equipamento e assistência técnica.

Conforme Pinho e Galdino (2014), é comum dimensionar o inversor utilizando o fator de dimensionamento do inversor (FDI) que representa a relação entre a potência

nominal CA do inversor e a potência de pico do gerador para se obter uma melhor relação custo benefício. De acordo com a literatura, o limite superior de FDI recomendado por fabricantes e instaladores é 1,05. Dessa forma, pode-se calcular a potência do inversor pela fórmula:

$$FDI = \frac{P_i (W)}{P_{max} (W_p)} \quad (15)$$

Onde:

- FDI (adimensional) – Fator de dimensionamento do inversor
- $P_i (W)$ – Potencia nominal em corrente alternada do inversor
- $P_{max} (W_p)$ – Potencia de pico do painel

Portanto:

$$P_i = FDI * P_{max} = 1,05 * 1605 = 1685,25 W \quad (16)$$

Logo, um inversor de 2 kW atende ao dimensionamento realizado. Nesse sentido, será feito uma análise das principais marcas e modelos de inversores fotovoltaicos comercializados no mercado brasileiro. Assim, foram escolhidas 5 marcas que são referências, no Brasil e no exterior nesse ramo: ABB, EcoSolys, Growatt, INVT e Refusol.

Assim, busca-se relacionar a potência máxima, a eficiência, certificações, garantia, preço e recursos extras disponíveis como *wifi* de diferentes fabricantes a fim de compará-las e observar qual delas possui o melhor custo-benefício para o projeto.

Todas essas informações são exibidas na tabela 10. Elas foram encontradas por meio de consultas nos seguintes *sites* de vendas de inversores solares: MERCADOLIVRE (2021), ENERGIATOTAL (2021) e ENERGYSHOP (2021).

Tabela 10 – Comparação dos inversores

Fabricante	Modelo	Potência (kW)	Eficiência (%)	Monitoramento <i>Wi-fi</i>	MPPT	Certificações (INMETRO)	Garantia	Preço (R\$)
ABB	UNO-DM-2.0-TL	2	96,7	Sim	Sim	Sim	5 anos	7706,86
EcoSolys	ECOS2000 2KW	2	95	Não	Sim	Sim	5 anos	3199,00
Growatt	MIC2000TL-X	2	97,2	Sim	Sim	Sim	10 anos	2800,00
INVT	MG2KTL	2	97,2	Não	Sim	Sim	2 anos	2500,00
Refusol	REFUSOL 1.6KW	1,6	97,5	Sim	Sim	Sim	5 anos	3799,00

Fonte: ENERGYSHOP, 2021

Dessa maneira, escolheu-se o inversor solar do modelo MIC2000TL-X 2 KW fabricado pela Growatt, cujas especificações foram exibidas na figura 20. Considerou-se nessa escolha o tempo de garantia, eficiência, recurso *wifi* e preço. Esse inversor possui o selo do INMETRO. A garantia do fabricante é de 10 anos.

Figura 20 – Especificações elétricas do inversor

Ficha de dados	MIC 1000TL-X	MIC 1500TL-X	MIC 2000TL-X
Dados de entrada			
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulo STC)	1400W	2100W	2800W
Máxima tensão CC	500V	500V	500V
Tensão de partida	50V	50V	50V
Faixa de tensão MPPT/Tensão nominal	50V-500V /180V	50V-500V /250V	50V-500V /360V
Máxima corrente de entrada por trackers MPPT			13A
Máxima corrente curto-circuito por trackers MPPT			16A
Número de MPPT / strings por MPPT			1/1
Saída (CA)			
Potência nominal de saída	1000W	1500W	2000W
Potência aparente máxima de CA	1000VA	1500VA	2000VA
Máxima corrente de saída	4.8A	7.1A	9.5A
Tensão nominal de saída(Faixa)			230V(180Vac-280Vac)
Frequência da rede CA(Faixa)			50Hz/60Hz ± 5Hz
Fator de potência ajustável			0. 8l-0. 8c
THDI			<3%
Conexão CA			Fase Única
Eficiência			
Máx. eficiência	97.4%	97.4%	97.4%
Euro-eta	96.5%	97.0%	97.0%

Fonte: GROWATT, 2021

Ele possui os seguintes dispositivos de proteção internos: Proteção contra polaridade reversa CC, Chave Seccionadora CC, Proteção de sobretensão CC, Proteção de sobretensão CA, Monitoramento de falta de terra, Monitoramento da rede elétrica, Monitoramento de corrente residual, Monitoramento de resistência de isolamento e Proteção Anti-Ilhamento.

Pode-se calcular o número máximo de módulos que o inversor suporta dividindo a potência do inversor pela potência de pico de um módulo.

$$N_{mMax} = \frac{P_{inv} (W)}{P_{max} (W_p)} = \frac{2000}{535} = 3,73$$

Isso significa que a quantidade de módulos igual a 3, dimensionado anteriormente, está em conformidade com o número máximo de módulos que o inversor suporta.

5.4.3 ARRANJO DOS MÓDULOS

A próxima etapa é definir o tipo de ligação dos módulos: série, paralela ou mista. Considerando inicialmente a ligação dos três módulos em série, busca-se determinar se essa ligação atende aos requisitos mínimos de conexão dos módulos ao inversor.

Desse modo, é importante considerar, primeiramente, que a tensão de entrada suportável do inversor não deve ser ultrapassada a fim de não danificar o equipamento. Para isso utiliza-se a equação abaixo:

$$N_{Módulos_{série}} * V_{oc} < V_{max}$$

De acordo com o catálogo do fabricante, o valor de máxima tensão de um módulo (V_{oc}), que ocorre quando o painel está em circuito aberto, vale 46,2 V. Conforme o catálogo do inversor o valor de tensão máxima de entrada permitida V_{max} é 500V. Para os 3 módulos em série, tem-se:

$$3 * 46,2 < 500 \quad (19)$$

Portanto, a primeira condição imposta foi respeitada. Além disso, a quantidade de módulos em série deve atender a faixa de tensão MPPT do inversor, já que a temperatura dos módulos pode atingir mais de 70°C durante o verão no Brasil. Isso pode levar a uma redução de tensão do sistema, que não pode ser inferior a mínima tensão do MPPT do inversor ($V_{mpptMIN}$). Caso isso aconteça, a eficiência do inversor diminuirá bastante e poderá haver sua desconexão.

Da mesma forma, em épocas mais frias, a tensão do sistema pode aumentar. Porém ela não pode ultrapassar a máxima tensão do MPPT do inversor (Pinho; Galdino,2014). Essas duas últimas condições são respeitadas caso a equação abaixo seja satisfeita.

$$\frac{V_{mpptMIN}}{V_{mpTmax}} < N_{Módulos_{série}} < \frac{V_{mpptMAX}}{V_{mpTmin}} \quad (20)$$

Onde:

- V_{mpTmax} – Tensão de potência máxima de um modulo na maior temperatura de operação prevista;
- V_{mpTmin} – Tensão de potência máxima de um modulo na menor temperatura de operação prevista;
- $V_{mpptMAX}$ – Máxima tensão CC de operação do MPPT do inversor;
- $V_{mpptMIN}$ – Mínima tensão CC de operação do MPPT do inversor.

Os valores de máxima e mínima tensão CC de operação do MPPT do inversor podem ser encontrados no catálogo. Já os valores de tensão de potência máxima na maior e menor temperatura de operação podem ser calculados pela equação abaixo.

$$V_{mpTmin} = V_{mp} * (1 + \beta(T_{opMin} - 25)) \quad (21)$$

$$V_{mpTmax} = V_{mp} * (1 + \beta(T_{opMax} - 25)) \quad (22)$$

Onde:

- V_{mp} – Tensão de potência máxima de um módulo que vale 38,4 V;
- T_{opMin} – Menor temperatura de operação prevista que vale -40°C ;
- T_{opMax} – Maior temperatura de operação prevista 85°C ;
- β – Coeficiente de variação de tensão devido a temperatura que vale $-0,26\%/^{\circ}\text{C}$.

Assim, utilizando os valores do catálogo do módulo podemos calcular:

$$V_{mpTmin} = 38,4 * (1 + (-0,0026)(-40 - 25)) = 44,89 \quad (23)$$

$$V_{mpTmax} = 38,4 * (1 + (-0,26)(85 - 25)) = 32,41 \quad (24)$$

$$\frac{50}{32,41} < 3 < \frac{500}{44,89} \quad (25)$$

$$1,54 < 3 < 11,14 \quad (26)$$

Portanto, a segunda condição imposta de variação da tensão devido a variação da temperatura também foi respeitada. Ela é importante devido a dependência entre a tensão e a temperatura e suas variações em condições extremas de inverno e verão.

Por fim, deve-se verificar se a corrente máxima de entrada CC não será ultrapassada. Para isso, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$I_{sc} < I_{maxE} \quad (27)$$

Onde:

- I_{sc} – Corrente de curto circuito do módulo nas STC (*Standard Test Conditions*);

- I_{maxE} – Corrente máxima de curto circuito na entrada do inversor.

Assim, utilizando os valores do catálogo do módulo e do inversor podemos verificar:

$$13,85 < 16 \quad (28)$$

Portanto, a última condição imposta também foi respeitada. Logo, o arranjo dos três módulos em série é adequado para a conexão com o inversor e atende todos os requisitos acima mencionados.

5.4.4 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E CONDUTORES

5.4.4.1 Chave seccionadora

A chave seccionadora CA deve ser compatível com a potência da geração. Ela deve ter uma suportabilidade maior que a corrente de saída do inversor de 9,5 A. Escolheu-se então uma chave seccionadora de 12 A da marca WEG, exibida na figura 21.

Figura 21 - Especificações da chave seccionadora



Código: 12258395
 Referência: MSW 12 P-2H
 Corrente nominal: 12A
 Fixação: Topo
 Número de polos: 2 polos

Fonte: MERCADOLIVRE, 2021

5.4.4.2 Condutores

Segundo a IEC 60364-7-712, pode-se considerar uma corrente admissível igual a 1,25 vezes a corrente de curto circuito, a fim de dimensionar os condutores de corrente contínua do sistema fotovoltaico. Portanto, temos:

$$I = 1,25 * 13,85 = 17,31 \text{ A} \quad (29)$$

De acordo com a tabela do anexo C da NBR 16612, considerando um condutor ao ar livre exposto ao sol, método de instalação 1, a seção é de no mínimo 1,5 mm². Porém, serão utilizados condutores de seção igual a 4 mm², conforme recomendado pelo catálogo do fabricante (Anexo A). Eles possuem 41 A de capacidade de condução de corrente.

Figura 22 – Especificações do condutor CC



Fonte: MERCADOLIVRE, 2021

Para dimensionar os condutores de corrente alternada utiliza-se o mesmo critério anterior:

$$I = 1,25 * 9,5 = 11,87 \text{ A} \quad (30)$$

De acordo com a tabela 36 da NBR 5410, considerando um condutor de cobre com isolação de PVC, método de instalação B1, a seção é de 1,0 mm². Porém, serão utilizados condutores de seção igual a 2,5 mm², conforme recomendado pelo método da seção mínima. Eles possuem 24 A de capacidade de condução de corrente.

5.4.4.3 Diodos e fusíveis

Conforme explicado na fundamentação teórica, podem ser utilizados diodos, fusíveis e outros dispositivos para a proteção de um sistema fotovoltaico. Visa-se, nesta etapa, dimensioná-los.

Há nesse modelo de módulo 3 diodos de desvio ou bypass incorporados (Anexo A). Portanto, não é preciso dimensioná-los.

Os fusíveis de proteção série e os diodos de bloqueio não são necessários, uma vez que não há conexão de grupos de módulos em paralelo. Assim, não haverá fluxo de corrente de um conjunto para outro com tensões diferentes, visto que se tem apenas um conjunto com três módulos em série nesse projeto.

5.4.4.4 Disjuntores

Foi utilizado o critério abaixo, estabelecido pela ABNT NBR 5410, para dimensionar os disjuntores.

$$I_b < I_n < I_z \quad (31)$$

Onde:

- I_b – Corrente de projeto;
- I_n – Corrente nominal;
- I_z – Capacidade de condução de corrente do condutor.

Dimensiona-se, primeiramente, um disjuntor CC que será conectado entre os módulos e o inversor, a fim de realizar manobra e proteção desse trecho de circuito.

$$13,02 < I_n < 41 \quad (32)$$

Escolheu-se então um disjuntor CC de 16 A, cujas informações técnicas estão exibidas na figura 23.

Figura 23 – Especificações do Disjuntor CC



Fonte: MERCADOLIVRE, 2021

Dimensiona-se, também, um disjuntor CA que será conectado entre o inversor e a rede, a fim de realizar manobra e proteção desse trecho de circuito.

$$9,5 < I_n < 24 \quad (33)$$

Escolheu-se então um disjuntor CC de 16 A, cujas informações técnicas estão exibidas na figura 24.

Figura 24 – Especificações do Disjuntor CA



Disjuntor termomagnético easy9,
 2p, 16a, curva b, 3ka, 400v -
 schneider electric

Fonte: MERCADOLIVRE, 2021

5.4.4.5 DPS

No caso do DPS do lado CC, deve-se escolher um que tenha tensão superior a tensão do grupo de módulos e menor que a tensão máxima admitida pelos equipamentos.

$$V_{gm} < V_{dps} < V_{max} \quad (34)$$

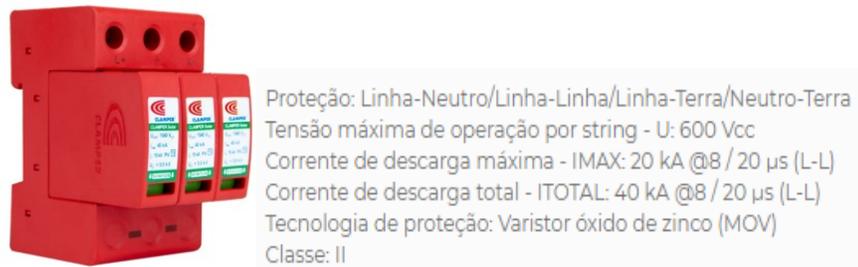
$$138,6 < V_{dps} < 1000 \quad (35)$$

No caso do DPS do lado CA, deve-se escolher um que tenha tensão superior a tensão de saída do inversor e menor que a tensão máxima admitida pelos equipamentos.

$$230 < V_{dps} < 280 \quad (36)$$

Escolheu-se então dois dispositivos DPS de 600 Vcc e 40 KA no lado CC (figura 25) e um DPS de 275 Vca e 45 kA no lado CA (figura 26).

Figura 25 – Especificações do DPS CC



Fonte: Clamper, 2021

Figura 26 – Especificações do DPS CA



Proteção: Linha / Neutro ou Linha / Terra ou Neutro / Terra
 Tensão de operação: 127 / 220 V @50 / 60 Hz
 Máxima tensão de operação contínua - UC: 175 Vca, 275 Vca ou 460 Vca
 Máxima corrente de curto-circuito sem fusível backup: 5 kA
 Corrente de descarga máxima - I_{max}: 45kA
 Tecnologia de proteção: Varistor
 Proteção térmica: Sim
 Seção dos condutores de conexão: 4 a 25 mm²
 Sinalização: Através de bandeirola
 Fixação: Trilho DIN 35 mm ou Garra (NEMA)
 Classe: II

Fonte: Clamper, 2021

5.4.4.6 Suporte para os módulos

Os suportes são utilizados para fixar os painéis de forma estável, garantir uma boa ventilação natural que permite a dissipação de calor, se adaptar as condições do telhado e dos módulos, dar uma orientação e inclinação adequados. Eles devem suportar o peso dos módulos que pesam 27,8 kg cada, resistir a corrosão e ventos fortes. Percebe-se então a importância desse elemento no sistema fotovoltaico.

Existem diferentes estruturas de suporte feitas de diferentes materiais como o alumínio, por exemplo. Além disso, existem diferentes opções para se adequar a cada tipo de telhado, por exemplo com telha de cerâmica, de cimento, em laje, entre outras opções.

Nesse projeto optou-se por uma estrutura de alumínio adaptados para telha de cimento com espaço suficiente para os 3 painéis, que inclui o conjunto de fixadores.

Figura 27 – Suporte para os módulos



Fonte: MERCADOLIVRE, 2021

6 ANÁLISE FINANCEIRA

Nesta etapa, busca-se avaliar a viabilidade técnica e econômica do projeto. Para isso, será feito um levantamento dos custos iniciais que engloba o preço de aquisição dos equipamentos, projeto e mão de obra de instalação. Posteriormente, será calculado a economia com o projeto e o prazo de retorno de investimento. Por fim, será feita uma comparação deste investimento com outros disponíveis no mercado.

6.1 ENERGIA GERADA

Para calcular a energia gerada por um módulo, basta aplicar a fórmula abaixo que relaciona a irradiação solar média (kWh/m².dia), a área (m²) e a eficiência do módulo. Esses valores foram calculados anteriormente e retirados do catálogo.

$$E_m = I * A_m * n \quad (37)$$

$$E_m = 5,47 * 2,56 * 0,209 = 2,93 \frac{\text{kWh}}{\text{dia} * \text{módulo}} \quad (38)$$

Depois multiplica-se esse resultado por 3 (número de módulos) e por 365 (dias no ano) para encontrar a energia gerada anualmente.

$$E_m = 3 * 365 * 2,93 = 3204,70 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \quad (39)$$

Esse valor é a energia gerada máxima teórica possível que seria produzida em um cenário ideal sem perdas adicionais além da eficiência. Porém, conforme discutido na etapa de dimensionamento do sistema, existem perdas adicionais devido aos condutores, ao acúmulo de poeira, à temperatura de operação, à baixa irradiância, ao inversor, entre outras. Assim, considerou-se uma taxa de desempenho de 75%, ou seja, considerando o pior caso, as perdas consideradas no sistema fotovoltaico representam 25% da energia seria gerada.

$$E_m = 0,75 * 3204,7 = 2403,70 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \quad (40)$$

Assim, a capacidade de geração de energia é de 2403,7 kWh por ano levando em consideração as perdas.

6.2 INVESTIMENTO INICIAL

Utilizando os modelos dos equipamentos dimensionados anteriormente, consultou-se os preços em *sites* de venda na internet, principalmente nos *sites* da *Energy Shop* e do Mercado Livre, para elaborar a tabela 11. Ela exhibe os valores de cada equipamento e o preço final do conjunto.

Os custos de projeto e mão de obra exibidos foram obtidos em contato com empresas de energia solar na cidade de Uberlândia. Eles envolvem a realização do memorial descritivo, diagramas elétricos, homologação do sistema, instalação e solicitação de vistoria.

Tabela 11 – Orçamento

Item	Fabricante	Modelo	Preço Unitário(R\$)	Quantidade	Preço Final (R\$)
Cabo	Cordeiro	Solar 4mm ²	8,73	30 metros	261,80
Cabo	Megatron	2,5 mm ²	2,00	20 metros	40,00
Chave	Weg	Msw12 12A	106,87	1	106,87
Disjuntor CC	Kayal	DZ47- 63C16 16A 2p 500v	60,36	1	60,36
Disjuntor CA	Schneider	EZ9F13216	52,50	1	52,50
DPS CA	Clamper	VCL front 275 V CA classe II	50,90	2	101,80
DPS CC	Clamper	Solar 600V CC classe II	140,90	1	140,90
Estrutura suporte dos módulos	DGTEC	-	750,00	1	750,00
Painel	Canadian Solar	CS6W- 535MS (535Wp)	400,00	3	1200,00
Inversor	Growatt	MIC2000TL- X 2	2800,00	1	2800,00
Projeto	-	-	-	-	2000,00
Mão de Obra	-	-	-	-	3200,00
				Total	10714,23

Fonte: Do Autor, 2021

Portanto, o valor inicial de investimento será de R\$ 10714,23 reais.

6.3 CUSTOS DE MANUTENÇÃO

Para calcular mais precisamente a viabilidade para um tempo de 25 anos, é preciso considerar os custos de manutenção do sistema fotovoltaico, o aumento das tarifas de energia, diminuição da eficiência dos módulos e vida útil dos equipamentos.

Em relação a vida útil, cada fabricante estima a durabilidade de seus equipamentos. Considerando o módulo escolhido da Canadian Solar, a garantia do fabricante é de 12 anos para defeitos de fabricação, 25 anos de até 80% da eficiência, o que leva a uma taxa de degradação anual de 0,8% (CANADIANSOLAR, 2021). Já para

o inversor da Growatt, a garantia do fabricante é de 10 anos para defeitos de fabricação, porém sua vida útil pode chegar a 15 anos dependendo das condições do ambiente e ocorrência de descargas atmosféricas (ENERGIA, 2020). Então, teoricamente será necessário a aquisição de outro inversor após 12 anos aproximadamente.

A taxa de inflação acumulada de 2011 até 2020, obtida por meio da média do IPCA (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo), é de 5,84% ao ano (NUBANK, 2021). Considerando esse valor estável para fins de simplificação de cálculo, o inversor de R\$ 2800,00 em 2021 custará R\$ 5530,00 após doze anos.

Além disso, há a limpeza dos módulos que deve ser feita a fim de diminuir problemas em relação ao acúmulo de poeira, uma vez que dificultam a captação da luz pelos módulos, que pode levar a perda de potência gerada e desempenho (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Porém, ela pode ser realizada pelo usuário do sistema, o que diminui os custos de manutenção.

6.4 FLUXO DE CAIXA

A tabela 12 mostra todos os custos relacionados ao sistema fotovoltaico citados anteriormente.

Tabela 12 – Despesa total com sistema fotovoltaico

Despesa	Valor
Investimento Inicial	10714,23
Troca Inversor	5530,00
Total	16244,23

Fonte: Do Autor, 2021

Portanto, serão gastos R\$ 16244,23 no total com o sistema fotovoltaico ao longo de 25 anos, sendo que a troca do inversor será realizada no décimo segundo ano. Para fins de cálculo, será considerado o pagamento desses valores à vista.

O valor da tarifa de energia em kWh aplicado pela CEMIG, para um consumidor residencial bifásico subgrupo B1, varia ao longo do ano. Para fins de cálculo, considerou-se o valor médio dos valores de tarifa (com impostos inclusos) aplicados entre junho de

2020 e julho de 2021. Esse cálculo foi exibido na tabela 13 a partir das informações das contas de energia da unidade consumidora analisada.

Tabela 13 – Valor tarifa energia com impostos

Mês	Valor (Reais)
Junho/20	0,934917
Julho/20	0,950087
Agosto/20	0,959370
Setembro/20	0,929560
Outubro/20	0,919821
Novembro/20	0,922994
Dezembro/20	0,973613
Janeiro/21	0,972950
Fevereiro/21	0,946113
Março/21	0,942752
Abril/21	0,939708
Mai/21	0,972551
Junho/21	0,998251
Média anual	0,950976

Fonte: Do Autor, 2021

Portanto, a tarifa média anual é de 0,950976 R\$/kWh para um consumidor.

Dificuldades são encontradas para estipular o aumento no custo da energia devido aos aumentos dos impostos, taxas, bandeiras vigentes, dentre outros fatores. Assim, devido a essa imprevisibilidade e instabilidade dos últimos reajustes no preço da energia, considerou-se o histórico de reajuste anuais da CEMIG e encontrou-se uma taxa de reajuste médio da tarifa de energia aproximadamente igual a 10% ao ano.

Com todas essas informações foi possível elaborar a tabela 14, que exhibe os valores de produção de energia e lucro em função da energia produzida (kWh) e tarifa média para cada ano.

Na segunda coluna são apresentados os valores de tarifa que começa em 0,950976 R\$/kWh com reajuste de 10% ao ano. Na terceira coluna são apresentados os valores de produção anual de energia que começa em 2403,7 kWh e decai em 0,8% ao ano devido à degradação dos módulos. Na quarta coluna são exibidos os valores de produção de energia em reais encontrados pela multiplicação dos dois últimos valores. E na quinta coluna é exibido o fluxo de caixa que subtrai a produção obtida em reais pelo

valor do investimento inicial igual a R\$ 10714,23 que vai sendo abatido ao longo dos anos com o lucro. Por fim, no 12º ano foi adicionado o custo de substituição do inversor de R\$ 5530,00.

Tabela 14 – Fluxo de caixa ao longo de 25 anos de produção de energia

Ano	Preço(reais)	Energia Produzida (kWh)	Economia (reais)	Fluxo de caixa (reais)
1	0,950976	2403,7	2285,86	-8428,37
2	1,046074	2384,47	2494,33	-5934,04
3	1,150681	2365,395	2721,81	-3212,22
4	1,265749	2346,471	2970,04	-242,18
5	1,392324	2327,7	3240,91	2998,73
6	1,531556	2309,078	3536,48	6535,22
7	1,684712	2290,605	3859,01	10394,23
8	1,853183	2272,281	4210,95	14605,18
9	2,038502	2254,102	4594,99	19200,17
10	2,242352	2236,07	5014,05	24214,22
11	2,466587	2218,181	5471,34	29685,56
12	2,713246	2200,436	5970,32	30125,88
13	2,984570	2182,832	6514,82	36640,70
14	3,283027	2165,369	7108,97	43749,66
15	3,611330	2148,046	7757,30	51506,97
16	3,972463	2130,862	8464,77	59971,74
17	4,369709	2113,815	9236,76	69208,50
18	4,806680	2096,905	10079,15	79287,65
19	5,287348	2080,129	10998,37	90286,01
20	5,816083	2063,488	12001,42	102287,43
21	6,397691	2046,981	13095,95	115383,38
22	7,037460	2030,605	14290,30	129673,68
23	7,741206	2014,36	15593,57	145267,26
24	8,515327	1998,245	17015,71	162282,96
25	9,366859	1982,259	18567,54	180850,51

Fonte: Do Autor, 2021

Utilizando a tabela anterior, foi possível elaborar o gráfico exibido na figura 27 que mostra o aumento do lucro com o sistema em reais ao longo dos 25 anos.

Figura 28 – Gráfico do fluxo de caixa em função dos anos decorridos



Fonte: Do Autor, 2021

Um capital acumulado igual a R\$ 180850,00 será o economizado na conta de energia elétrica ao final de 25 anos com a utilização desse sistema fotovoltaico.

Estima-se que seja produzido aproximadamente 2400 kWh/ano que é suficiente para o consumo de 3099 kWh/ano calculado na tabela 1. Optou-se por dimensionar o sistema para gerar apenas o consumo de energia que pode ser abatido como créditos na conta, já que há a obrigatoriedade de pagamento da tarifa mínima equivalente a 50 kWh/mês para esse tipo de unidade consumidora, mesmo que a energia gerada seja maior que a consumida.

Caso o sistema fotovoltaico gere no mês uma quantidade maior que o consumo da residência, em condições favoráveis, o medidor irá registrar essa energia excedente e serão gerados créditos de energia que podem ser compensados nas próximas faturas. Esses créditos podem ser utilizados em até 5 anos na própria unidade de geração ou em outras unidades do mesmo dono do sistema fotovoltaico, desde que ela seja cadastrada e atendida pela mesma distribuidora (Pinho; Galdino,2014). Porém, serão cobrados impostos sobre o consumo desses créditos gerados por outra unidade.

Portanto, devido a isso, ao custo de disponibilidade e a forma como foi definido o sistema de compensação de energia, não é vantajoso gerar uma energia anual maior

que o consumo anual. Por isso, escolheu-se nesse projeto um sistema fotovoltaico que gere apenas o suficiente para o consumo da própria unidade.

6.5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Foram usados três indicadores para estimar o desempenho do sistema fotovoltaico projetado. Entre eles estão: Produtividade Energética, Taxa de Desempenho e Fator de Capacidade. Os cálculos deles serão realizados com base no primeiro ano de geração de energia do sistema que gerará 2403,7 kWh em 365 dias.

Nessa etapa, busca-se encontrar os valores desses indicadores e compará-los com a literatura, a fim de saber se estão em conformidade com o encontrado por outros autores.

A Produtividade Energética ou *Final Yield* (Y_f) demonstra a relação entre a energia elétrica gerada (E) em kWh e a potência de pico instalada (P) em kWp, dada pela equação abaixo. Esse indicador é expresso em kWh/kWp ou em horas e mostra a quantidade de tempo que seria necessário para gerar a mesma energia caso o sistema funcionasse com potência máxima (ZILLES, 2002).

$$Y_f = \frac{E}{P_{int}} \quad (41)$$

$$Y_f = \frac{2403,7}{1,605} = 1497,63 \text{ horas} \quad (42)$$

Esse número demonstra que seriam necessárias quase 1500 horas de funcionamento anual do sistema fotovoltaico com potência nominal para produzir a mesma energia entregue no período analisado. Por outro lado, em termos de Produtividade Energética também pode-se afirmar que o sistema possui uma produtividade anual igual a aproximadamente 1500 kWh/kWp no período.

Foi encontrado um Y_f igual a 1259 kWh/kWp no sistema de 2 kWp no prédio da Engenharia Mecânica da UFSC e um Y_f igual a 1429 kWh/kWp no sistema de 0,75 kWp

nas dependências do LSF da USP (BENEDITO,2009). Portanto, nota-se uma proximidade entre os resultados obtidos e encontrados por outros autores.

Outro indicador de desempenho é o Fator de Capacidade (FC). Ele demonstra a relação entre a energia gerada (E) em kWh e a energia gerada com potência nominal (Pn) em kWp durante um tempo (h) em horas úteis com disponibilidade de sol por certo tempo de análise (t) em dias, dada pela equação abaixo (ZILLES, 2002). Nota-se então uma relação entre a energia que será entregue pelo sistema e a energia que ele entregaria se operasse 100% do tempo com potência nominal.

$$FC = \frac{E}{Pn * h * t} \quad (43)$$

$$FC = \frac{2403,7}{1,605 * 24 * 365} = 17,09 \% \quad (44)$$

Foi encontrado um FC igual a 14% no sistema de 2 kWp no prédio da Engenharia Mecânica da UFSC e um FC igual a 18,3% no sistema de 0,75 kWp nas dependências do LSF da USP (BENEDITO,2009). Portanto, nota-se uma proximidade entre os resultados obtidos e encontrados por outros autores

Por fim, outro indicador de desempenho é a Taxa de Desempenho (TD) ou *Performance Ratio (PR)*. Ela é expressa em % e demonstra a relação entre a produtividade energética (Yf) e a quantidade de horas de sol pleno (HSP) por ano, dada pela equação abaixo (ZILLES, 2002).

$$TD = \frac{Yf}{HSP * t} \quad (45)$$

$$TD = \frac{1497,63}{5,47 * 365} = 75,01 \% \quad (46)$$

Tem-se, então, um desempenho global igual a 75,01%. Essa é a capacidade do sistema em converter a energia solar disponível no plano inclinado dos painéis em energia elétrica CA. Esse valor vai ao encontro do valor definido como taxa de

desempenho no início do dimensionamento, escolhido igual a 75%. Portanto, o resultado encontrado confirma e corrobora o estipulado anteriormente.

Foi encontrado um FD igual a 81,4% no sistema de 0,75 kWp nas dependências do LSF da USP (BENEDITO,2009). Portanto, nota-se uma proximidade entre os resultados obtidos e encontrados por outros autores

No Brasil, a TD pode alcançar até 80% e o FC está entre 13% e 18% para sistemas fotovoltaicos variando conforme a disponibilidade do recurso solar, da tecnologia e forma de dimensionamento adotado (BENEDITO,2009). Além disso, conforme Pinho e Galdino (2014), a TD está entre 70 e 80%.

Ademais, resultados semelhantes foram encontrados por MELO (2019) com uma TD igual a 75,34 %, FC igual a 18,25% e Yf igual a 1598,978 kWh/kWp para um sistema fotovoltaico com inversor *string*.

Dessa forma, os valores calculados neste trabalho de TD igual a 75,01 %, FC igual a 17,09 % e Yf igual a 1497,63 kWh/kWp estão de acordo com os encontrados por outros autores e disponíveis na literatura.

6.6 RETORNO DO INVESTIMENTO

O prazo de retorno do investimento (PRI) ou *payback* estima o tempo necessário para que o investimento seja recuperado. Ele é uma variável importante para avaliar o retorno financeiro de uma aplicação e mostra quanto um investidor pode ganhar ou perder (SEBRAE, 2018).

Analisando a tabela 14 e a figura 28, podemos concluir que o investimento se torna rentável entre o quarto e quinto ano, mais precisamente 4 anos e um mês. Neste tempo, o investimento inicial é recuperado e o sistema fotovoltaico começa a gerar lucro. Dessa forma, o prazo de retorno do investimento é igual a 4,083 anos.

O PRI pode mudar muito devido a variação dos custos iniciais do projeto, do valor da tarifa do kWh e da energia produzida pelo sistema fotovoltaico. No entanto, outros autores também encontraram resultados semelhantes como SOUSA e FRANCO (2018) que obtiveram um PRI de 4 anos e 2 meses, DUARTE (2019) que obteve um PRI de 4 anos e 3 meses e OLIVEIRA (2018) que obteve um PRI de 5 anos. Esse resultado vai ao

encontro dos resultados obtidos pelo Portal Solar, empresa reconhecida nacionalmente no ramo, que aponta um *payback* médio de 5 anos (SOLAR, 2021).

6.7 VIABILIDADE ECONÔMICA

A rentabilidade do sistema é o percentual de valorização de um investimento em relação ao montante investido (ECONOMIAS, 2021). Ela considera o lucro ganho com o valor investido por meio da equação abaixo:

$$\text{Rentabilidade} = \frac{\text{Economia}}{\text{Investimento}} \quad (47)$$

Para fins de simplificação do cálculo de rentabilidade, utiliza-se o valor de lucro obtido no primeiro ano e o valor do investimento inicial temos:

$$\text{Rentabilidade} = \frac{2285,86}{10714,23} = 21,33\% \quad (48)$$

Portanto, a rentabilidade do sistema é igual a 21,33 %. Outros autores também encontraram resultados semelhantes como SOUSA e FRANCO (2018) que obtiveram 19,76% e OLIVEIRA (2018) que obteve 19,68% de rentabilidade.

A tabela 15 apresenta a rentabilidade acumulada de janeiro a dezembro de 2020 de alguns tipos de investimentos a fim de realizar uma comparação.

Tabela 15 – Rentabilidades de investimentos em 2020

Investimento	Rentabilidade
Ouro B3	55,93%
Euro mercado	41,45%
IGP-M	23,14%
Tesouro IPCA+ 2024	8,74%
Tesouro Prefixado 2023	8,24%
Poupança	2,11%
Tesouro Selic 2021	2,48%
Ibovespa	2,92%

Fonte: ECONOMIAS, 2021

Portanto, a rentabilidade inicial do sistema fotovoltaico é maior que muitos investimentos como a poupança, o tesouro IPCA+2024 e a Ibovespa. Porém, está abaixo de investimentos como o Ouro e o Euro Mercado que possuem rentabilidades acumuladas maiores, mas com renda variável ao invés de fixa.

Entretanto, vale destacar que o investimento em um sistema de geração de energia solar é um investimento de baixo risco em comparação com os citados na tabela anterior, uma vez que ele depende das condições climáticas que são pautadas no histórico de irradiação e das variações do preço do kWh que tende a aumentar com o agravamento da crise hídrica, energética e os reajustes anuais (G1, 2021).

Dessa forma, para investidores mais conservadores que buscam mais segurança e menos riscos a longo prazo, investir na energia solar é uma boa opção devido à alta rentabilidade. Assim, conclui-se que o sistema fotovoltaico tem alta viabilidade econômica para sua realização.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho visou projetar um sistema de geração fotovoltaico ligado à rede a fim de estudar sua viabilidade de implantação para uma residência e gerar economias com gastos de energia elétrica. Para isso, buscou-se realizar uma breve revisão da literatura existente, analisar o consumo de energia, dimensionar os componentes do sistema fotovoltaico e os dispositivos de proteção, estimar o investimento inicial e os custos do projeto, estimar os indicadores de desempenho e analisar sua viabilidade econômica por meio de uma análise financeira.

Neste estudo, considerou-se a irradiação solar média, utilizando o *software* SunData disponibilizado pelo CRESESB, para atender o consumo médio mensal da residência já descontando o custo de disponibilidade e as perdas envolvidas. Além disso, foram consideradas questões técnicas e de desempenho dos dispositivos utilizados, os recursos financeiros disponíveis para investimento e a área disponível para a instalação.

Nesse sentido, encontrou-se um valor de 1,605 kWp de potência instalada requerida para a unidade consumidora. Desse modo, o sistema fotovoltaico foi dimensionado com 3 módulos de 535 Wp e um inversor de tensão de 2 kW. A fim de garantir o correto funcionamento do sistema, considerou-se as informações técnicas do módulo e do inversor como parâmetros para o restante das especificações dos outros componentes, como condutores e dispositivos de proteção.

Foi possível realizar também um estudo de análise financeira, em que se calculou a energia gerada por ano, o valor do investimento total, a economia de energia, os lucros obtidos ao longo da vida útil do sistema fotovoltaico e indicadores de análise econômica como a prazo de retorno do investimento e a rentabilidade. O investimento inicial será de R\$ 10714,23 incluso a aquisição dos equipamentos, o projeto e a mão de obra. O prazo de retorno do investimento calculado é igual a 4 anos e um mês e a rentabilidade será 21,33% ao ano, o que gerará uma economia de aproximadamente R\$ 180850,00 ao final de 25 anos de funcionamento.

A partir disso, foi possível concluir que o projeto é viável economicamente, com um prazo de retorno relativamente aceitável e rentabilidade superior a alguns investimentos de baixo risco de renda fixa como a poupança e o tesouro direto. Caso a

geração em um mês seja superior ao consumo, créditos em kWh serão gerados e poderão ser utilizados pelo consumidor durante 60 meses no local de geração ou em outras residências de mesma titularidade.

Foram usados três indicadores para estimar o desempenho do sistema fotovoltaico projetado: Produtividade Energética, Taxa de Desempenho e Fator de Capacidade. Foram encontrados seus valores que se mostraram adequados dentro do esperado na literatura e em conformidade com os encontrados por outros autores.

Portanto, esse estudo mostrou-se relevante, uma vez que a utilização da energia solar é uma forma alternativa, sustentável e renovável de energia que contribui para a preservação do meio ambiente e traz diversos benefícios para o consumidor de energia. Esse investimento tem grande potencial de crescimento no mercado brasileiro com um cenário favorável devido à crise energética atual, questões climáticas e econômicas, desenvolvimento da tecnologia e diminuição dos custos de aquisição dos equipamentos do sistema fotovoltaico. Essa alternativa também deve ser impulsionada pela tendência de aumento da tarifa de energia elétrica, conforme mostrado na tabela 14, principalmente devido aos reajustes médios dos últimos anos.

Além disso, o trabalho apresenta uma solução de pequeno porte para uma residência, que pode ser utilizada como base para elaboração de projetos maiores como de usinas fotovoltaicas que podem atingir potências da ordem de MWp. Essa é uma alternativa viável para países dependentes de combustíveis fósseis para geração de energia elétrica, uma vez que é uma solução para atender a demanda energética de um território com menor degradação do meio ambiente e menos emissão de poluentes.

Por fim, buscou-se utilizar uma linguagem clara e precisa a fim de trazer um referencial teórico produtivo e abordar os elementos essenciais em um projeto fotovoltaico residencial. Nessa perspectiva, este trabalho tem papel importante no compartilhamento de conteúdo e informação para os estudantes e público geral interessados em aprender sobre esse tema e também para aqueles que desconhecem essa alternativa de geração de energia que podem utilizar este trabalho para melhorar seus conhecimentos na área. Dessa maneira, será possível aumentar o nível de conhecimento e ampliar o interesse das pessoas sobre a temática e como ela pode contribuir para o planeta e auxiliar na economia de energia dos próprios usuários.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “**NBR 5410: Instalações elétricas em baixa tensão**”, 2004.

ABINEE. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012.

AIE. Agência Internacional de Energia. **Relatório Renewables**. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2019>>. Acesso em: 02 jul. 2021.

AMERISOLAR. **Datasheet Placa Solar**. 2021. Disponível em: <<https://www.amerisolarbrasil.com.br>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº414**. 2010. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?Version=1.0>>. Acesso em: 04 jul. 2021.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº482**. 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2021.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº687**. 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2021.

ASSAIFE, B. M. **Aterramento e proteção de sistemas fotovoltaicos**. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16690**: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto. Brasil,

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16612**: Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura — Requisitos de desempenho. Brasil, 2020.

BENEDITO, R. S. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por Meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**. Dissertação de mestrado, USP, São Paulo, 2009.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia (Org.) – **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2021**. Epe., p. 113. 2018.

CANADIANSOLAR. Datasheet, 2021. **Placa Solar**. Disponível em: <<https://www.canadiansolar.com>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

CEPEL-CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 50 p. 2014.

CLAMPER. **DPS clamper solar**. 2021. Disponível em: <<https://www.lojaclamper.com.br/>>. Acesso em: 18 ago. 2021.

COSTA, G. R. S. et al. **Impactos ambientais causados pelos painéis solares: percepção dos discentes da UFRA**. 2019. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2019B33.

CRESESB. **Energia solar Princípios e aplicações**. Rio de Janeiro, 50 p. BRASIL. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). 2006. Disponível em: <www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2021.

CRESESB. **Potencial Solar Sun Data v 3.0**. 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 15 jul. 2021.

DUARTE, Heitor Monte. **Estudo de caso de duas usinas fotovoltaicas com tipos diferentes de inversores**. 2019, p. 55.

ECONOMIAS, Minhas. **Melhores investimentos 2020**. 2021. Disponível em: <<http://minhaseconomias.com.br/blog/investimentos/melhores-investimentos-2020>>. Acesso em: 15 set. 2021.

ENERGIATOTAL. **Módulos**. 2021. Disponível em:

<<https://www.energiatotal.com.br/painel-solar>>. Acesso em: 03 set. 2021.

ENERGIA, Insol. **Painéis e inversores fotovoltaicos**. 2020. Disponível em: <

<https://insolenergia.com.br/blog/paineis-e-inversores-fotovoltaicos-qual-a-durabilidade-desses-equipamentos->>. Acesso em: 03 set. 2021.

ENERGYSHOP. **Módulos**. 2021. Disponível em:

<<https://www.energyshop.com.br/placa-solar>>. Acesso em: 09 ago. 2021.

G1. **Conta de luz está cada vez mais cara**. 2021. Disponível em: <

<https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/08/27/conta-de-luz-esta-cada-vez-mais-cara-entenda-por-que-ela-sobe-e-quais-os-problemas-dessa-escalada-de-precos.ghtml>>. Acesso em: 15 set. 2021.

GROWATT. **Datasheet**. 2021. Disponível em: < <https://www.ginverter.pt>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

IEA. *International energy agency*. **Strategic PV Analysis and Outreach**. 2020.

Disponível em:

<https://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=https%3A%2F%2Fiea-pvps.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F04%2FIEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf>. Acesso em:

04 jul. 2021.

IEC 60364-7-712:2002 – **Electrical installations of buildings** – Part 7-712:

Requirements for special installations or locations – Solar photovoltaic

(PV) power supply systems (Ed.1)

JASOLAR. **Datasheet**. 2021. Disponível em: <https://www.jasolar.com/html/en/en_pv/>.

Acesso em: 03 set. 2021.

JESUS, Fernando. **Os melhores painéis fotovoltaicos 2020**. Portal Energia, 2020.

Disponível em: < <https://www.portal-energia.com/os-melhores-paineis-fotovoltaicos-2020>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

JINKOSOLAR. **Datasheet**. 2021. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com>>. Acesso em: 06 set. 2021.

MALVINO, Albert; BATES, David. **Eletrônica**. Volume I. 8ª Edição. Porto Alegre. Editora AMGH. 2016.

MELO, Arthur de Paula. **Estudo do impacto no prazo de retorno do investimento em geradores fotovoltaicas de pequeno porte utilizando micPRInversores e inversores string**. 2019, p. 19.

MERCADOLIVRE. **Painel Solar Fotovoltaico**. 2021. Disponível em: <https://lista.mercadolivre.com.br/energia-eletrica-solar/>. Acesso em: 12 set. 2021.

NUBANK. **Inflação na década**. 2021. Disponível em: <<https://blog.nubank.com.br/inflacao-na-decada/>>. Acesso em: 19 set. 2021.

OLIVEIRA, Luiz Henrique de. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede de energia elétrica**. 2018, p. 52.

OLIVEIRA, W. D. et al. **A eficiência energética do sistema solar fotovoltaico: instalação de um painel solar em residência**. 2019.

OVELHA, R. M. R. V. **Projeto, Dimensionamento e Instalação de Solução Fotovoltaica numa moradia offgrid**. 2017.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel / Cresesb, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2021.

POLITIZE. **Acordo de Paris**. 2021. Disponível em: <<https://www.politize.com.br/acordo-de-paris/>>. Acesso em: 09 set. 2021.

RESEARCH, Capital. **Valor Presente líquido**. 2020. Disponível em: <<https://www.capitalresearch.com.br/blog/investimentos/valor-presente-liquido-vpl/>>. Acesso em: 25 ago. 2021.

RUTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**. Florianópolis: Editora UFSC/LABSOLAR, 2004.

SEBRAE. **Prazo de Retorno do Investimento**. 2018. Disponível em: <<https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/prazo-de-retorno-do-investimento-pri,90da5415e6433410VgnVCM1000003b74010aRCRD>>. Acesso em: 25 ago. 2021.

SERODIO, Guilherme. **Geração distribuída de fonte solar fotovoltaica dobrará até 2024**, 2019. Disponível em: <<https://epbr.com.br/geracao-distribuida-de-fonte-solar-fotovoltaica-dobrara-ate-2024-aponta-agencia-internacional-de-energia-aie/>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

SOLAR, Portal. **Célula fotovoltaica**. 2020. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html#:~:text=A%20seguir%2C%20confira%20as%20diferentes,produ%C3%A7%C3%A3o%20em%20s%C3%A9rie%2014%25%3B>>. Acesso em: 02 set. 2021.

SOLAR, Portal. **Energia Solar Residencial**. 2019. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-residencial.html>>. Acesso em: 13 set. 2021.

SOLAR, Portal. **Retorno do Investimento em Energia Solar**. 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/retorno-do-investimento-em-energia-solar-2>>. Acesso em: 15 set. 2021.

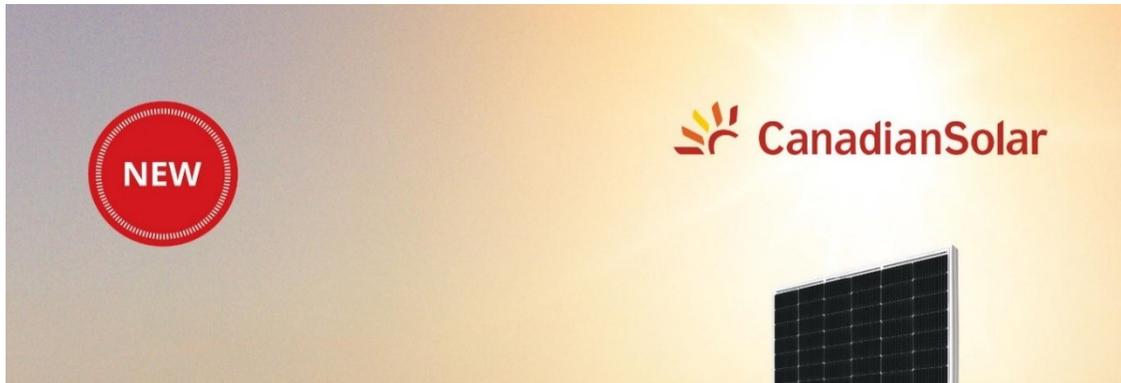
SOUSA, Cleberton Pereira; FRANCO, Tiago Aparecido Silveira. **Projeto e instalação de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede de distribuição**. 2018, p. 65.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

YINGLISOLAR. **Datasheet**. 2021. Disponível em: <<http://www.yinglisolar.com/br/products/solar-modules>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A.B.; DE OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**, Editora Oficina do texto, São Paulo. 2002.

ANEXO A – Ficha Técnica Módulo Fotovoltaico



HiKu6 Mono PERC

525 W ~ 550 W

CS6W-525 | 530 | 535 | 540 | 545 | 550MS

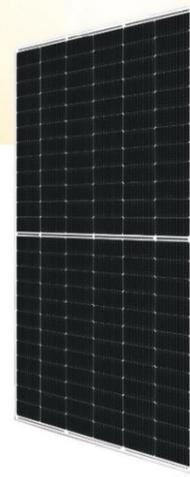
MORE POWER

-  Module power up to 550 W
Module efficiency up to 21.5 %
-  Up to 4.5 % lower LCOE
Up to 5.6 % lower system cost
-  Comprehensive LID / LeTID mitigation technology, up to 50% lower degradation
-  Compatible with mainstream trackers, cost effective product for utility power plant
-  Better shading tolerance

MORE RELIABLE

-  Minimizes micro-crack impacts
-  Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 2400 Pa*

 CanadianSolar



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

 **25 Years** Linear Power Performance Warranty*

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

*According to the applicable Canadian Solar Limited Warranty Statement.

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

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

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730 / INMETRO
UL 61730 / IEC 61701 / IEC 62716
UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1 / Take-e-way



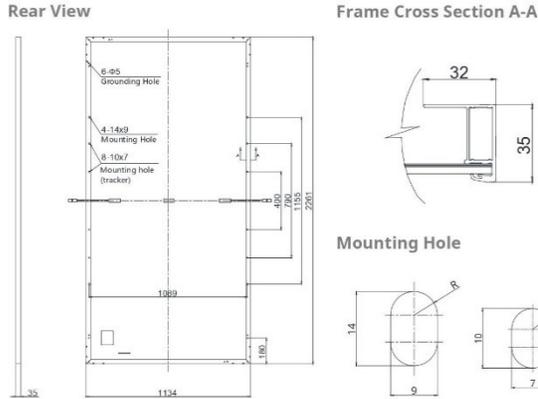
* The specific certificates applicable to different module types and markets will vary, and therefore not all of the certifications listed herein will simultaneously apply to the products you order or use. Please contact your local Canadian Solar sales representative to confirm the specific certificates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

CSI Solar Co., Ltd. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. Canadian Solar was recognized as the No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in the IHS Module Customer Insight Survey, and is a leading PV project developer and manufacturer of solar modules, with over 50 GW deployed around the world since 2001.

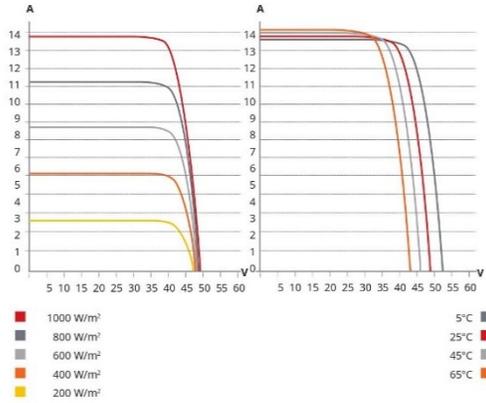
* For detailed information, please refer to the Installation Manual.

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

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS6W-530MS / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS6W	525MS	530MS	535MS	540MS	545MS	550MS
Nominal Max. Power (Pmax)	525 W	530 W	535 W	540 W	545 W	550 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	40.7 V	40.9 V	41.1 V	41.3 V	41.5 V	41.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	12.90 A	12.96 A	13.02 A	13.08 A	13.14 A	13.20 A
Open Circuit Voltage (Voc)	48.6 V	48.8 V	49.0 V	49.2 V	49.4 V	49.6 V
Short Circuit Current (Isc)	13.75 A	13.80 A	13.85 A	13.90 A	13.95 A	14.00 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.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline
Cell Arrangement	144 [2 x (12 x 6)]
Dimensions	2261 x 1134 x 35 mm (89.0 x 44.6 x 1.38 in)
Weight	27.8 kg (61.3 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4 mm² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	410 mm (16.1 in) (+) / 290 mm (11.4 in) (-) or customized length*
Connector	T4 series or H4 UTX or MC4-EVO2
Per Pallet	30 pieces
Per Container (40' HQ)	600 pieces

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

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS6W	525MS	530MS	535MS	540MS	545MS	550MS
Nominal Max. Power (Pmax)	392 W	396 W	400 W	403 W	407 W	411 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	38.0 V	38.2 V	38.4 V	38.6 V	38.8 V	39.0 V
Opt. Operating Current (Imp)	10.33 A	10.37 A	10.42 A	10.45 A	10.49 A	10.54 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.8 V	46.0 V	46.2 V	46.4 V	46.6 V	46.8 V
Short Circuit Current (Isc)	11.09 A	11.13 A	11.17 A	11.21 A	11.25 A	11.30 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.

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	42 ± 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.

ANEXO B – Ficha Técnica Inversor

MIC 1000~3000TL-X

- Eficiência máxima de 97,6%
- Design compacto
- Tecla touch & Display OLED
- Interface flexível
- Serviço online



P O W E R
- I N G O
T O M O -
R R O W O

Growatt

www.ginverter.com

Ficha de dados	MIC 1000TL-X	MIC 1500TL-X	MIC 2000TL-X	MIC 2500TL-X	MIC 3000TL-X
Dados de entrada					
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulo STC)	1400W	2100W	2800W	3500W	4200W
Máxima tensão CC	500V	500V	500V	550V	550V
Tensão de partida	50V	50V	50V	80V	80V
Faixa de tensão MPPT/tensão nominal	50V-500V /180V	50V-500V /250V	50V-500V /360V	65V-550V /360V	65V-550V /360V
Máxima corrente de entrada por trackers MPP	13A				
Máxima corrente curto-circuito por trackers MPP	16A				
Número de MPPT / strings por MPPT	1/1				
Saída (CA)					
Potência nominal de saída	1000W	1500W	2000W	2500W	3000W
Potência aparente máxima de CA	1000VA	1500VA	2000VA	2500VA	3000VA
Máxima corrente de saída	4.8A	7.1A	9.5A	11.9A	14.3A
Tensão nominal de saída(Faixa)	230V(180Vac-280Vac)				
Frequência da rede CA(Faixa)	50Hz/60Hz ± 5Hz				
Fator de potência ajustável	0. 8f-0. 8c				
THDI	< 3%				
Conexão CA	Fase única				
Eficiência					
Máx. eficiência	97.4%	97.4%	97.4%	97.6%	97.6%
Euro-eta	96.5%	97.0%	97.0%	97.0%	97.1%
Dispositivos de proteção					
Proteção de polaridade reversa de CC	Sim				
Interruptor CC	Sim				
Varistor para proteção de surtos CC	Sim				
Monitoramento de resistência de isolamento	Sim				
Varistor para proteção de surtos CA	Sim				
Monitoramento de falha de terra	Sim				
Monitoramento de rede	Sim				
Proteção anti-ilhamento	Sim				
Unidade de monitoramento de corrente residual	Sim				
Dados Gerais					
Dimensões (L/A/P)	274/254/138mm				
Peso	6.0kg	6.0kg	6.0kg	6.2kg	6.2kg
Faixa de temperatura operacional	- 25°C ... + 60°C (> 45°C Derating)				
Emissão de ruído	≤ 25 dB(A)				
Altitude	4000m(13123ft)				
Consumo naturno	< 0.5 W				
Topologia	Sem transformador				
Resfriamento	Convenção natural				
Grau de proteção	IP65				
Humidade relativa	100%				
Características					
Conexões CC	H4/MC4				
Conexões CA	Conector				
Exibição	OLED				
Interfaces: RS485 / USB / Wi-Fi	Sim/Sim/Sim				
Garantia : 5 anos	Sim				
CE, CEI0-21, VDE-AR-N4105, VDE0126-1-1, UTE C 15-712-1, EN50549, IEC60068, IEC61683, IEC62116, IEC61727 INMETRO, G98, C10/C11, AS4777, AS/NZS3100, UNE217001, UNE206007, PO12.2					