

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

CESAR HENRIQUE MECCA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CC-CC CUK PARA O
CARREGAMENTO DE BATERIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2022**

CESAR HENRIQUE MECCA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CC-CC CUK PARA O
CARREGAMENTO DE BATERIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica,
Departamento de Engenharias e Ciência da
Computação da Universidade Regional
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –
Câmpus de Erechim.**

Orientador: Prof. Esp. Glênio Luis de
Vasconcellos Rigoni

**ERECHIM - RS
2022**

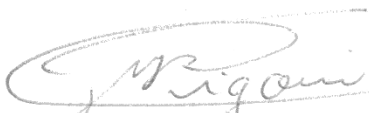
CESAR HENRIQUE MECCA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CC-CC CUK PARA O
CARREGAMENTO DE BATERIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

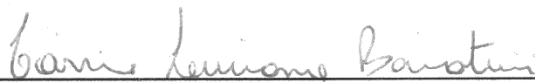
**Trabalho de conclusão de curso de Engenharia
Elétrica como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica,
Departamento de Engenharias e Ciência da
Computação da Universidade Regional
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –
Câmpus de Erechim.**

Erechim, 07 de dezembro de 2022.

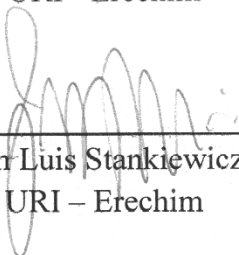
BANCA EXAMINADORA



Prof. Esp. Glênio Luis de Vasconcellos Rigoni (Orientador)
URI – Erechim



Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Examinador)
URI - Erechim



Prof. Me. Adilson Luis Stankiewicz (Examinador)
URI – Erechim

Dedico este trabalho a todos os familiares,
amigos e colegas que contribuíram para o seu
desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Simone ao meu filho Guilherme, pela paciência na minha ausência e pelo apoio incondicional durante todo o curso de Engenharia Elétrica, e pela compreensão e amor que me fizeram avançar.

À toda minha família, pelo auxílio e motivação que me fizeram com que eu continuasse. Em especial aos meus pais Henrique (in memoriam) e minha mãe Odila que me ensinaram a batalhar e a ter fé em Deus para nunca desistir de meus sonhos.

A todos meus colegas que de uma forma ou de outra contribuíram para o aprendizado e permaneceram ao meu lado durante toda a Graduação, aos companheiros de jornada Fabiano Kruger e Guilherme Sezne que permaneceram juntos até o fim, e em especial aos amigos Afonso Carlos Hinkel Junior e Cristiano Rafael França com quem pude contar pelo apoio em toda a jornada acadêmica.

À Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - Câmpus de Erechim e a seus funcionários e professores que contribuíram em toda a minha trajetória acadêmica, ao coordenador do curso de Engenharia Elétrica Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri, pelos ensinamentos e experiências repassadas durante todo o curso.

Ao meu orientador Prof. Esp. Glênio Luis de Vasconcellos Rigoni, pelos ensinamentos e pela disponibilidade em me atender a qualquer hora, que possibilitou sanar as minhas dúvidas e contribuindo para o termino deste trabalho.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

(Charles Chaplin)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um conversor CC-CC CUK para o carregamento de uma bateria estacionária no aproveitamento da energia solar fotovoltaica. Nesse sentido, apresentam-se conceitos básicos acerca da geração de energia solar fotovoltaica, como o funcionamento de uma célula e de um módulo fotovoltaico, as baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos *off-grid*, seus respectivos sistemas de carregamento, bem como métodos MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) para rastreamento de máxima potência. Além disso, realizou-se o equacionamento matemático do conversor CC-CC CUK para projeto e modos de operação, a simulação do conversor e do sistema integrado, e a montagem do sistema em um protótipo. Os resultados obtidos satisfazem os requisitos descritos nos objetivos e mostram a eficiência do conversor CUK no carregamento da bateria e no emprego da técnica de rastreamento da máxima potência. Os valores encontrados nos testes experimentais estão em concordância aos calculados, validando os procedimentos metodológicos propostos, bem como evidenciam o adequado funcionamento do sistema de processamento de energia.

Palavras-chave: Conversor CC-CC CUK. Energia Solar Fotovoltaica. Sistemas *off-grid*. MPPT.

ABSTRACT

This paper presents the development of a DC-DC CUK converter for charging a stationary battery in the use of photovoltaic solar energy. Basic concepts about the generation of photovoltaic solar energy are presented, such as the functioning of a cell and a photovoltaic module, the batteries used in off-grid photovoltaic systems, their respective charging systems, as well as MPPT (Maximum Power Point Tracking) for maximum power tracking. Besides, the mathematical equation of the DC-DC CUK converter for design and operation modes was effectuated, in addition to the simulation of the converter and the integrated system, and the assembly of the system in a prototype. The obtained results satisfy the requirements described in the objectives and show the efficiency of the CUK converter in battery charging and in the use of the maximum power tracking technique. The values found in the experimental tests are in agreement with the calculated ones, validating the proposed methodological procedures, as well as showing the proper functioning of the energy processing system.

Keywords: DC-DC converter. Solar Photovoltaic Energy. Renewable energy. Stationary battery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Matriz elétrica mundial (2019).....	18
Figura 2 – Emissões de CO ₂ da combustão em processos industriais (1900 - 2021).	19
Figura 3 – Matriz elétrica brasileira (2020).....	20
Figura 4 –Evolução da Capacidade Instalada do Brasil até 2026.....	21
Figura 5 – Irradiação média do Brasil e na Europa.	21
Figura 6 – Estrutura de uma Célula FV.	22
Figura 7 – Materiais Utilizados na fabricação de PV.	24
Figura 8 – Sistemas conectados à rede (<i>on-grid ou grid-tie</i>).	25
Figura 9 – Sistemas desconectados da rede (<i>off-grid</i>).	26
Figura 10 – Circuito equivalente de um painel fotovoltaico.	27
Figura 11 – Curva da Corrente e Tensão de um valor dado de R_p e R_s	28
Figura 12 – Diagrama de bloco da operação de rastreamento do MPPT.	28
Figura 13 – Método Perturba e Observa.....	29
Figura 14 - Rastreamento do método P&O de máxima potência em uma curva $P \times V$	30
Figura 15 – Componentes básicos de uma célula de bateria.	31
Figura 16 – Comparativo entre os tipos de baterias.	32
Figura 17 - Bateria Selada VRLA.	33
Figura 18 - Curva de Carga por Célula de Baterias Chumbo-Ácido.....	34
Figura 19 – Modelo de controlador de carga.....	34
Figura 20 - Topologia de um Conversor CC-CC CUK.	35
Figura 21 - Circuito Equivalente do Conversor CUK com Chave Fechada.....	36
Figura 22 - Circuito Equivalente do Conversor CUK com Chave Aberta.	36
Figura 23 - Corrente em IL para uma Indutância Alta.	37
Figura 24 - Circuito conversor CUK com chave fechada.	37
Figura 25 - Circuito conersor CUK com chave aberta.	38
Figura 26 – Estrutura do sistema proposto.	39
Figura 27 - Circuito simulado conversor CUK.	43
Figura 28 - Circuito simulado do painel fotovoltaico.....	44
Figura 29 – Sistema proposto integrado.	45
Figura 30 - Circuito CI LM 7810	49
Figura 31 – Drive PWM com CI PC817	49
Figura 32- Circuito de tensão do painel fotovoltaico.	51

Figura 33 - Circuito divisor de tensão	52
Figura 34 – Sensor de Corrente.	52
Figura 35 - Circuito simulado do conversor CUK.	56
Figura 36 - Circuito conversor CUK com chave aberta.	56
Figura 37 - Tensão de Entrada e Tensão de Saída do CUK.	57
Figura 38 - Corrente de Entrada e Corrente de Saída do CUK.	58
Figura 39 - Corrente no Indutor L2 e Corrente na Saída da Carga do CUK.	58
Figura 40 – Tensão no capacitor C1.	59
Figura 41 – Curva entre corrente e tensão do painel solar com variação de irradiação.	59
Figura 42 - Curva entre potência e tensão do painel solar.	60
Figura 43 – Curva entre corrente e tensão do painel solar com variação de temperatura.	60
Figura 44 – Simulação do sistema proposto integrado.	61
Figura 45 – Rastreabilidade do MPPT.	62
Figura 46 – Potência máxima por potência de saída do painel PV.	62
Figura 47 - Drive do PWM com CI isolador PC817	64
Figura 48 - Gráfico do Circuito Isolado PWM PC817	64
Figura 49 - Gráfico com as Variáveis do Conversor CUK.	65
Figura 50 - Temperatura PV	66
Figura 51 - Gráfico com as Variáveis do Conversor CUK.	66
Figura 52 - Curva entre corrente e tensão do painel a 62,1°C.	67
Figura 53 - Curva entre potência e tensão do painel solar a 62,1°C.	67
Figura 54 - Gráfico da Potência do PV	67
Figura 55 - Teste do Sistema Instalado	68
Figura 56 - Placa Implementada	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de eficiência das células FV de diversas matérias.....	23
Tabela 2 – Comparativo entre Arduino UNO e o ESP32.....	47
Tabela 3 – Pinos do ESP32	48
Tabela 4 - Valores definidos para o conversor CUK.....	53
Tabela 5 - Valores calculados do conversor CUK.	55
Tabela 6 – Conversor CUK comparação entre a da Simulação e os Cálculos.	57
Tabela 7 - Comparação entre a da Simulação e Medição a 62,1°C.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de energia solar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	<i>Silício Amorfo</i>
CdTe	<i>Telureto de cádmio</i>
CIGS	<i>Cobre Índio Gálio e Selênio</i>
CO ₂	<i>carbon dioxide</i>
DSSC	<i>dye sensitized solar cell</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	<i>Etil Vinil Acetato</i>
FM	<i>Frequency modulation</i>
FV	Fotovoltaica
GaAs	Arseneto de gálio
HIT/HJT	<i>Heterojunction technology</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
mono-Si	<i>monocrystalline silicon</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
multi-Si	<i>polycrystalline silicon</i>
OPV	<i>Organic Photovoltaics</i>
P&O	Perturba e Observa
PV	Painel fotovoltaico
PWM	Pulse Width Modulation
Si	<i>silicon</i>
Thin-Film	Filme fino
VRLA	<i>Valve Regulated Lead Acid</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitor
D	Razão cíclica
D	Diodo
E	Fonte
f	Frequência
G	Ganho estático do conversor
G	Terminal Gate (transistor)
I	Corrente
K	Constante de Boltzmann
L	Indutor
P	Potência
q	Carga do elétron
R	Resistência (carga)
S	Interruptor (transistor)
T	Temperatura ambiente
V	Tensão
V _o	Tensão de saída
Δ	Variação / Ondulação
η	Rendimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	17
1.2 Estrutura do trabalho	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Panorama Energético Mundial.....	18
2.1.1 Panorama Energético Brasileiro	19
2.2 Energia Solar Fotovoltaica	20
2.2.1 Célula Fotovoltaica	22
2.2.2 Tipos De Células Fotovoltaicas	23
2.2.3 Paine Solar Fotovoltaico.....	24
2.2.4 Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos	25
2.2.5 Propriedade de um Paine Solar Fotovoltaico	26
2.3 Rastreamento MPPT Perturba e Observa (P&O)	28
2.4 Sistema de Baterias e Carregadores	30
2.4.1 Sistema de Baterias.....	30
2.4.2 Carregamento da Bateria Chumbo-Ácido	33
2.4.3 Carregadores	34
2.4.3.1 Capacidade e Utilização	35
2.5 Conversor CUK.....	35
3 METODOLOGIA.....	39
3.1 Conversor CUK.....	40
3.2 Simulação utilizando <i>software</i> PSIM	42
3.2.1 Simulação do Conversor CUK	42
3.2.2 Simulação do Paine Solar Fotovoltaico	43
3.2.3 Simulação do sistema integrado ao MPPT	44
3.3 Desenvolvimento dos protótipos	46
3.3.1 Capacitor, Diodo, Indutor e Mosfet	46
3.3.2 Circuito de controle	46
3.3.3 Sistema I/O do ESP32	47
3.3.4 Fonte para alimentação dos circuitos.....	48
3.3.5 Circuito Drive para MOSFET	49
3.3.6 Circuito de Tensão do PV	50
3.3.7 Circuito de tensão da bateria.....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1 Projeto do conversor CUK	53
4.2 Simulação do conversor CUK	56
4.3 Simulação do Paine Solar Fotovoltaico	59
4.4 Simulação do MPPT com o Paine Solar Fotovoltaico e o CUK.....	61
4.5 Validação e implementação do circuito CUK com MPPT	63
4.5.1 Validação do circuito CUK	63
4.5.2 Validação do circuito MPPT	65
4.5.3 Implementação do circuito CUK de geração	68
5 CONCLUSÃO.....	70

5.1 Trabalhos Futuros.....	70
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO MPPT	76
APÊNDICE B – LISTA DE MATERIAIS.....	77
APÊNDICE C - DIAGRAMA DO SISTEMA	79
ANEXO A - DIAGRAMA DE LIGAÇÃO DO PINOS DO ESP32	80
ANEXO B – DATASHEET DO PINOS DO ESP32.....	81
ANEXO C – DATASHEET DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	83

1 INTRODUÇÃO

O mundo está em grande desenvolvimento científico e tecnológico e em expansão populacional, a matriz energética mundial é composta basicamente por fontes não renováveis de energia, como o petróleo, o carvão e o gás natural (EPE, 2022). Para atender a crescente demanda energética faz-se necessário uso de fontes renováveis de energia, que não prejudiquem demasiadamente o meio ambiente.

O nível de desenvolvimento de uma sociedade pode ser medido pelo seu consumo energético. A energia solar fotovoltaica ainda tem uma participação pequena a nível mundial. No entanto, a diminuição dos custos e aumento da eficiência contribui para tornar essa fonte de energia como uma alternativa viável para abranger uma fatia considerável da matriz energética mundial (VILLALVA, 2014).

A necessidade da diversificação e do aumento da partição de fontes renováveis na matriz energética acontece a várias décadas e em todos os continentes. Desta forma a procura por novas tecnologias com menores custos de fabricação e com uma maior eficiência para a produção de energia elétrica vem crescendo a cada ano. Entre elas os painéis fotovoltaicos (SANTOS; BRITO, 2021).

A energia solar fotovoltaica também pode ser instalada em locais remotos ou de difícil acesso, por intermédio de sistemas autônomos de geração denominados *off-grid*. Nessa estratégia, são utilizados conversores CC-CC que regulam a tensão e prolongam a vida útil do banco de baterias. Além disso, alguns modelos possuem a função de aumentar a eficiência do painel fotovoltaico por intermédio do Rastreamento de Máxima Potência, pelo qual é possível extrair o máximo de energia do painel.

Seguindo esse contexto e de forma a contribuir ao estudo aplicado em energia solar, apresenta o projeto e implementação de um conversor CC-CC Cuk que faça a regulagem da carga da bateria e realize o controle MPPT em um painel fotovoltaico, por meio da coleta dos sinais de dados do painel e da bateria.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são classificados em geral e específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

- O objetivo geral do trabalho é de projetar e montar um sistema de um conversor CC-CC CUK alimentado por um painel de energia fotovoltaica isolado com controle de carga da bateria.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar e analisar a geração de energia fotovoltaica;
- Realizar simulação do sistema de um conversor CC-CC CUK com o software Psim, a fim de verificar seus parâmetros de funcionamento;
- Gerenciar a carga da bateria para proteção de carga excessiva e carregamento;
- Analisar e registrar a topologia gerada pelo painel fotovoltaico e conversor CC-CC CUK;
- Realizar simulação, montagem e testes dos dois circuitos interligados.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo foi descrito a introdução, que aborda em si a geração, conversão e armazenamento de energia.

No segundo, foi contextualizada a revisão bibliográfica que se utilizou como suporte e amparo para a realização do estudo, através de publicações de autores especialistas na área da geração de energia, sistema fotovoltaico, eletrônica de potência, bem como artigos e trabalhos acadêmicos de especialização com o mesmo assunto abordado.

O terceiro capítulo é voltado à metodologia de estudo aplicada para a obtenção dos resultados, através das avaliações realizadas e levantamentos de dados, cálculos e simulações.

No quarto capítulo, se abordam os resultados e discussões sobre o estudo realizado, onde se apresentam os resultados obtidos com as avaliações e levantamentos, assim como as discussões sobre os mesmos.

O último capítulo trata das considerações finais sobre os resultados obtidos com a realização do projeto.

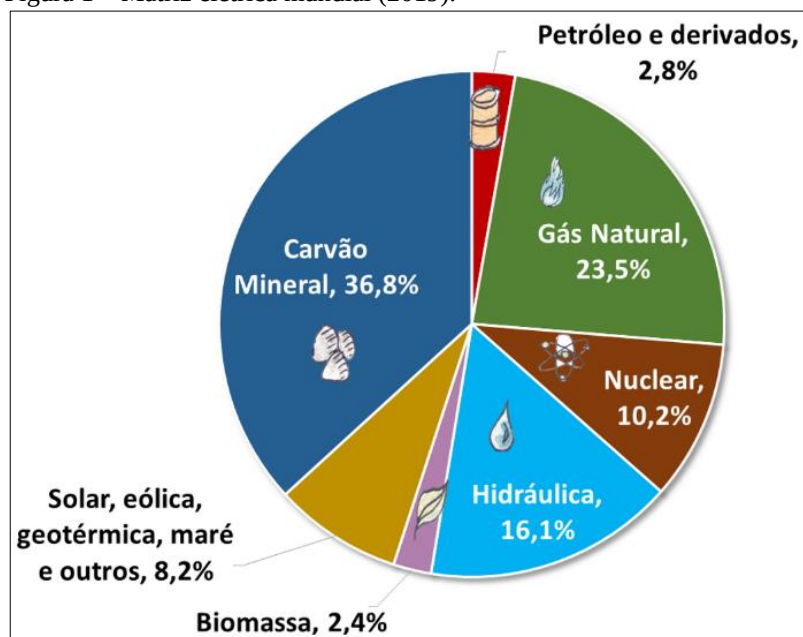
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre os sistemas que compõem o trabalho proposto, evidenciando o painel fotovoltaico, os tipos de conversores e as suas topologias, seus componentes eletrônicos e periféricos, os quais já foram utilizados em simulações e trabalhos acadêmicos e pesquisas científicas.

2.1 Panorama Energético Mundial

Apesar de grandes esforços serem feitos para tentar conter a grande emissão de poluentes na atmosfera da terra, isto não tem surtido efeito, uma vez que a matriz de geração mundial de energia elétrica ainda provém de fontes não renováveis como mostra a Figura 1.

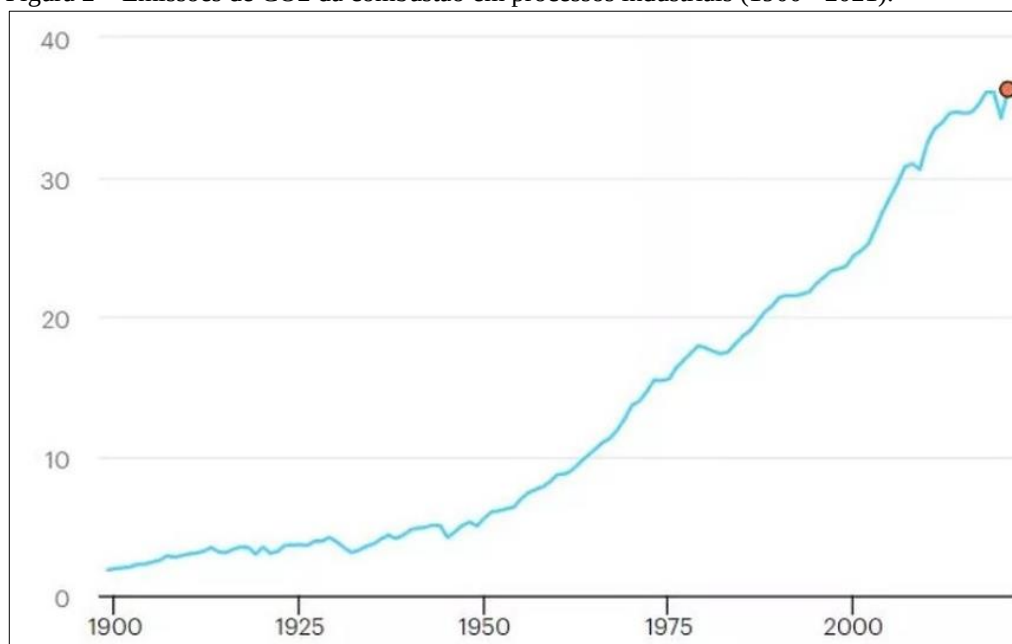
Figura 1 – Matriz elétrica mundial (2019).



Fonte - IEA (2021).

Diante deste cenário, o mundo está próximo da escassez de suas reservas naturais, em relação a sua matriz energética atual. As emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂) cresceram 6% no ano de 2020 para 2021, chegando a 36,3 bilhões de toneladas, sendo o nível mais alto da história segundo o novo relatório da Agência Internacional de Energia (IEA), a cerca de 40 anos ocorreram mais da metade das emissões de CO₂ da humanidade na atmosfera, como pode-se observar no gráfico da Figura 2.

Figura 2 – Emissões de CO₂ da combustão em processos industriais (1900 - 2021).



Fonte - IEA (2021).

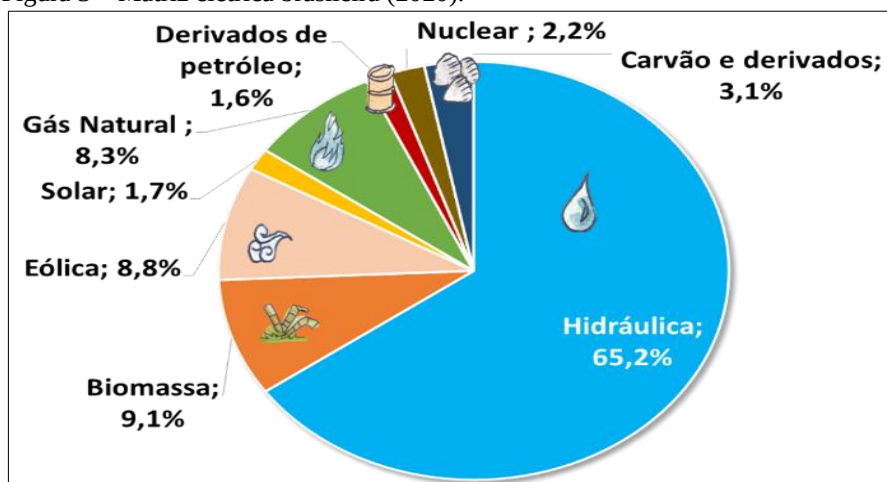
Assim as fontes de energias renováveis surgem como um recurso para diminuir a poluição mundial, podendo contribuir para geração de diversos setores de emprego e ocasionando o aumento da renda da população daquele país. Uma das fontes de energia renováveis que está em ascensão é a geração solar fotovoltaica (USTUNDAG e CEVIKCAN, 2018).

2.1.1 Panorama Energético Brasileiro

Acompanhando o desenvolvimento mundial o Brasil também teve um grande aumento do consumo de energia elétrica nos últimos anos, impulsionado pelo consumo industrial, comercial e residencial, o Brasil tem uma previsão de crescimento para o período de 2022-2026 de aumento de 3,4% ao ano (EPE, 2021).

Da matriz elétrica no Brasil, 65,2% provêm de geração hídrica, já as energias renováveis ocupam um espaço muito pequeno nessa matriz, a eólica ficando com apenas 8,3% e a solar fotovoltaica (FV) corresponde então a só 1,7% da matriz energética brasileira como mostra a Figura 3 (BEM, 2021).

Figura 3 – Matriz elétrica brasileira (2020).



Fonte - BEM (2021).

2.2 Energia Solar Fotovoltaica

Nosso planeta fornece a energia solar que é utilizada de duas formas distintas, sendo uma com a produção de calor para o aquecimento e a outra forma a geração de eletricidade, chamada então como a energia solar fotovoltaica.

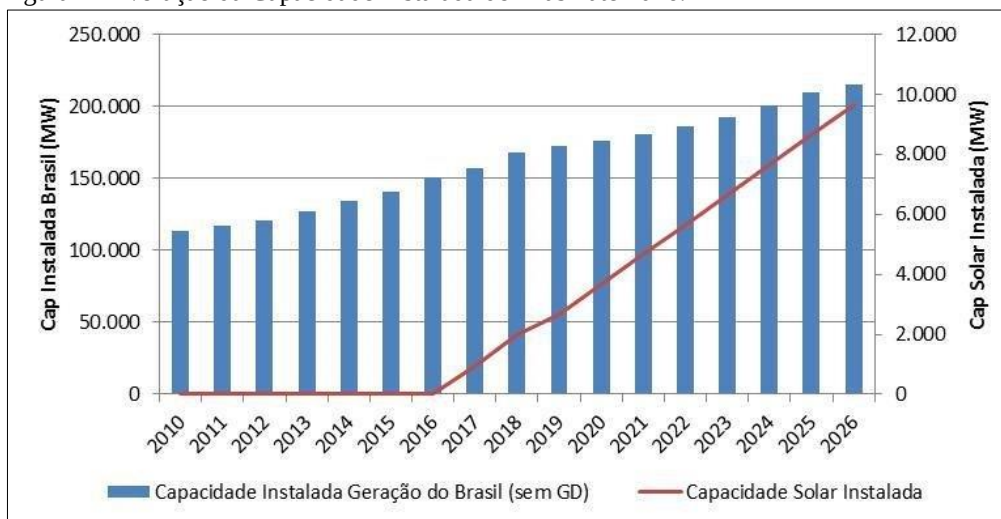
A energia solar ao passar pela atmosfera do nosso planeta é apresentada de duas formas que são eles os raios infravermelhos e os raios ultravioletas, eles são absorvidos e transformados em energia elétrica. Estes raios são definidos como a radiação solar e com eles gerada a energia solar.

Segundo Villalva (2015), a radiação solar é dividida em três grupos: radiação direta, radiação difusa e a radiação global. Radiação direta é a radiação que coincide com os raios solares atingindo diretamente em linha reta no plano horizontal, com a inclinação que provém do ângulo de inclinação zenital do sol. Na radiação difusa os raios solares atingem indiretamente o plano, motivados pela difração que os raios sofrem na atmosfera e quando houver a presença de nuvens, árvores, ou edificações, eles sofrem a reflexão. E a radiação global é o somatório da radiação direta e a difusa.

No sistema FV, a geração de eletricidade ocorre de forma direta, estimulando-se pela incidência de radiação solar algum material semicondutor (geralmente silício), que passa então a permitir o fluxo das partículas eletrônicas. (ANEEL, 2008).

A energia solar FV é uma energia renovável, gerada pela irradiação solar e pode ser utilizada em diversas tecnologias e está em constante evolução, é considerada uma fonte de energia limpa e renovável, é a geração de energia que está em maior ascensão no mundo. (VILLALVA, 2017). Está ascensão é notada no gráfico da Figura 4.

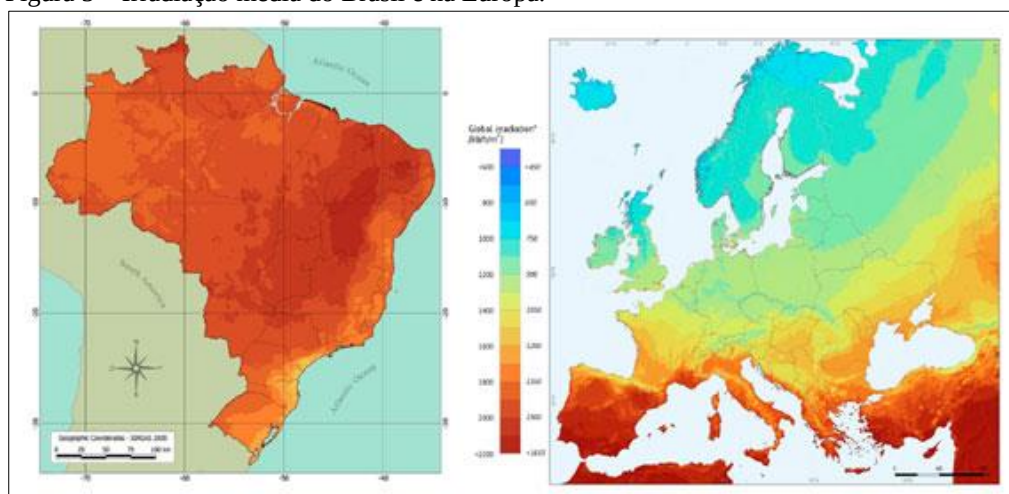
Figura 4 –Evolução da Capacidade Instalada do Brasil até 2026.



Fonte - Adaptado de EPE. (2017).

O Brasil possui uma média anual de irradiação solar de boa qualidade e uniforme, sendo essa muito maior que os países que utilizam a energia solar FV para a geração de energia elétrica em larga escala, como é o caso da Alemanha que fica localizado na região central do continente europeu (INPE, 2017). O mapa da Figura 5 confirma que a região do Brasil que recebe menos radiação solar, se for comparada com o índice de radiação solar da Alemanha, possui 1,4 vezes mais radiação, indicando assim como nosso potencial possibilita a instalação da tecnologia de energia solar FV (WEINERT, 2017).

Figura 5 – Irradiação média do Brasil e na Europa.



Fonte - Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006 e PVGIS, 2012.

Mesmo tendo melhor qualidade e quantidade de irradiação solar no Brasil do que nos países europeus, é utilizado apenas 1,7% em energia solar FT da sua matriz elétrica, conforme citado na Figura 3.

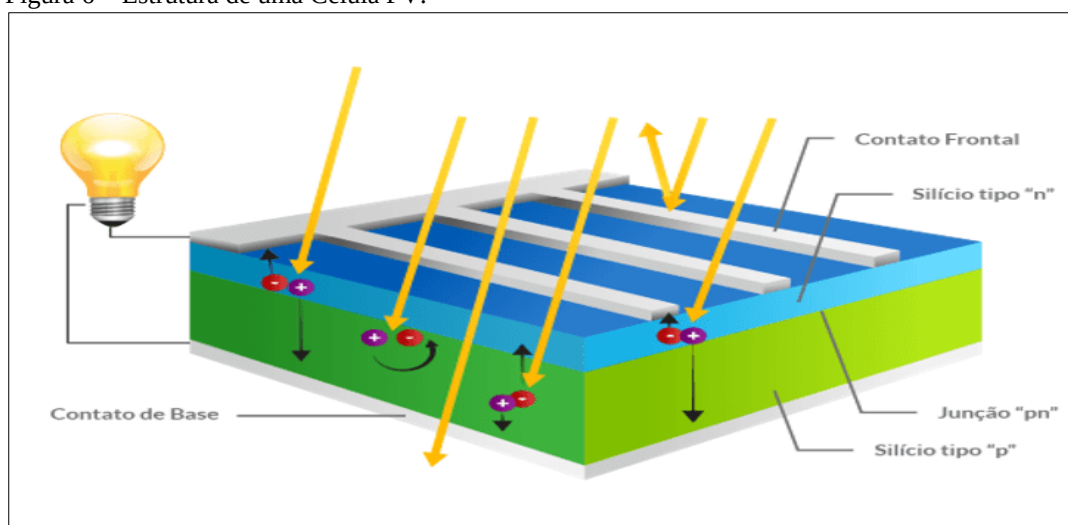
A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) já havia anunciado em seu relatório em 2018 que o sistema de energia solar está 80% mais barata que a 10 anos atrás, tornando-se assim um sistema muito mais acessível. Outro demonstrativo de que a energia solar está em grande ascensão é que segundo a Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR), em 2020 a capacidade instalada passou de 4,6 GW (gigawatts) para 7,5 GW.

2.2.1 Célula Fotovoltaica

A história da Célula FV foi constatada por Edmond Bequerel em 1839, ele verificou que a transformação da energia solar em energia elétrica ocorre pelo efeito fotovoltaico. Foi vista uma diferença de potencial nos extremos de um arranjo semicondutor, no momento em que era aplicado uma luz sobre ela. Após acontecerem novas descobertas na área da microeletrônica em 1956, a produção das células FV começou a ser realizada industrialmente. (DO NASCIMENTO, 2004).

Conforme Figura 6, as células FV possuem pelo menos duas camadas de semicondutores, formando então uma camada positivamente carregada e a outra negativamente carregada, criando assim uma junção eletrônica. No momento em que a radiação solar atingir o semicondutor no local da junção eletrônica, começa a existir o fluxo eletrônico que é liberado pelo campo elétrico que estava aí retido, dando início ao fluxo de energia no formato da corrente contínua. O fluxo eletrônico nesse caso é diretamente proporcional a intensidade de luz, quanto maior for a intensidade de luz maior será também a o fluxo de energia elétrica. Assim um sistema fotovoltaico pode operar sem o brilho do sol, podendo gerar eletricidade em dia nublados. (ANEEL, 2008).

Figura 6 – Estrutura de uma Célula FV.



Fonte - BLUE SOL (2022).

O fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade é o efeito fotovoltaico. Este fenômeno físico acontece no momento em que a radiação eletromagnética, ou a luz do sol, atinge uma célula que é feita de material semicondutores com certas propriedades específicas. (VILLALVA, 2015). O material silício (Si) é o mais utilizado na produção das células (FV), esse elemento químico é encontrado em grande quantidade no planeta. O Si é estudado em diversas formas: cristalino, policristalino e amorfo (CEMIG, 2012). A diferença entre eficiência de conversão energética dos vários tipos de células fotovoltaicas mais comercializadas no mercado pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo de eficiência das células FV de diversos matérias.

Materiais	Eficiência Máxima Teórica	Eficiência em Laboratório	Eficiência Produção em Série
Silício Monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício Policristalino	19,8%	15%	13%
Silício Amorfo	15%	10,5%	7,5%
CIGS	18,8%	14%	10%
CdTe	16,4%	10%	9%

Fonte - Adaptado *GeenPro*.

2.2.2 Tipos De Células Fotovoltaicas

Segundo o PORTAL SOLAR (2022), existem três gerações de células solares fotovoltaicas. Os tópicos a seguir mostram os tipos de células solares fotovoltaicas:

- Primeira geração:
 - Silício Cristalino
 - Silício monocristalino (mono-Si);
 - Silício policristalino (multi-Si);
- Segunda geração:
 - Filme fino (Thin-Film);
 - Silício amorfo (a-Si);
 - Seleneto de cobre índio (CIS);
 - Disseleneto de cobre, Índio e Gálio (CIGS);
 - Telureto de cádmio (CdTe);

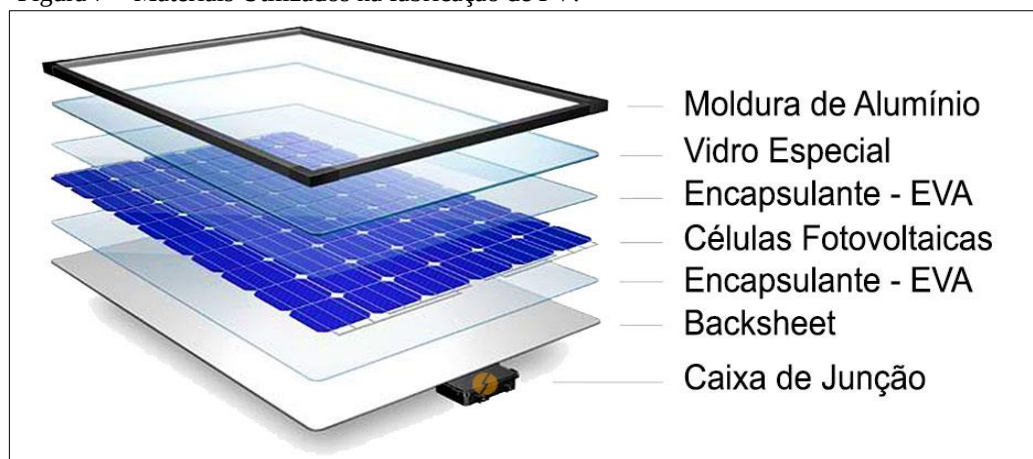
- Arseneto de gálio (GaAs);
- Multijunção;
- Terceira geração:
 - Camada de passivação localizada atrás da célula (PERC);
 - Híbrida de heterojunção (HIT/HJT);
 - Peroviskta;
 - Orgânica (OPV);
 - Sensibilizada por corante (DSSC).

O tipo de célula fotovoltaica mais comum é fabricado com o uso de silício cristalino (C-Si) da primeira geração, e a maior parte dos painéis fotovoltaicos que estão em funcionamento nas casas, indústrias ou usinas de energia solar utiliza a tecnologia monocristalina ou policristalina.

2.2.3 Painel Solar Fotovoltaico

O Painel fotovoltaico (PV), ilustrado na Figura 7, faz a captação e a conversão de energia solar em fluxo de corrente contínua. Segundo o Portal Solar (2022) a moldura de alumínio anodizado é instalado ao redor do PV e serve de estrutura para não torcer, garantindo a integridade de seus materiais como o vidro e suas células. O vidro especial é construído com baixo teor de ferro e desenvolvido para refletir menos a luz solar deixando assim ela passar através dele, que é temperado de 3.2mm ou 4mm, desenvolvidos para resistir a fortes chuvas de granizo. O encapsulamento em Etil Vinil Acetato (EVA), que é o filme de encapsulante para o painel solar, é composto de um material selante de cura rápida específico para os PV e serve para proteger o PV dos raios UV e altas temperatura e umidade.

Figura 7 – Materiais Utilizados na fabricação de PV.



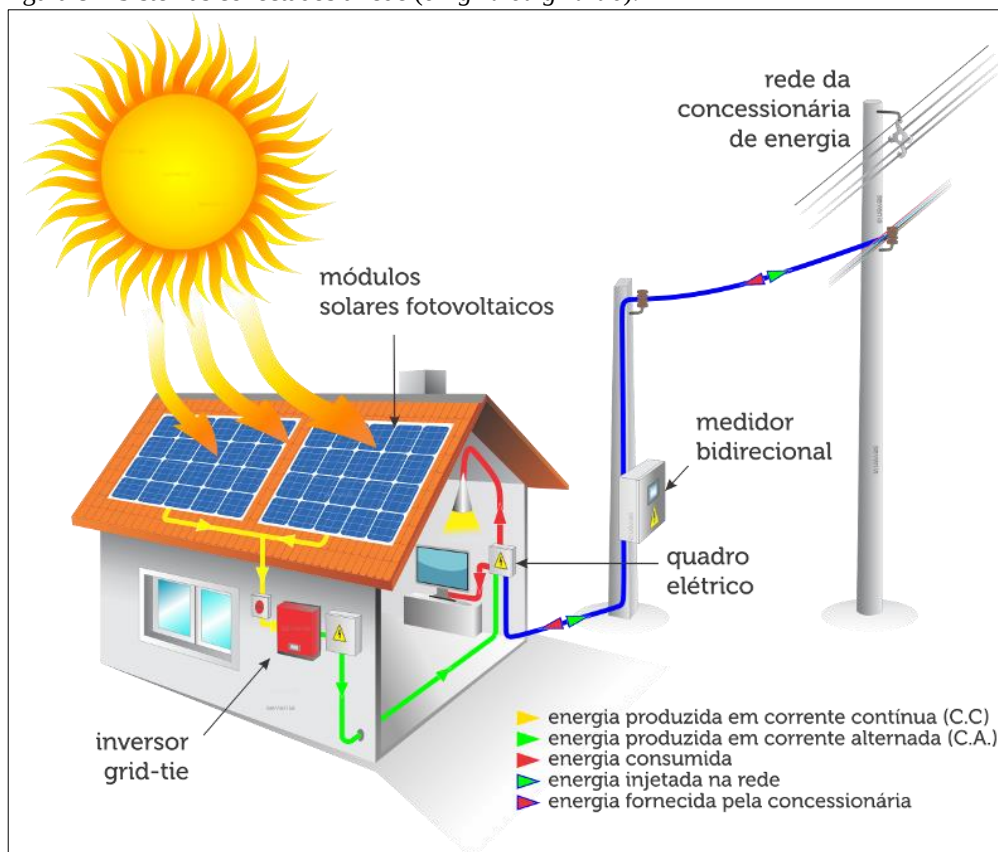
Fonte - PORTAL SOLAR (2022).

As células FV são muito sensíveis e trincam facilmente, elas são produzidas de uma fatia de cristal de silício puro, todo o painel solar é montado no intuito de proteger as células FV, para que também possam aumentar a sua vida útil por muitos anos. O *backsheet* é uma proteção que fica instalada atrás do PV, o qual é robusto e montado em três camadas de um filme de plástico branco. A caixa de junção tem função de fazer as ligações de todas as séries das células FV instalados no painel, ela fica instalada na parte traseira do painel e possui em seu interior os diodos de *by-pass* que fazem a proteção do PV, é nessa caixa de junção que são feitas as ligações com os outros.

2.2.4 Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em duas classes principais que são os sistemas isolados (*off-grid*) e os sistemas conectados à rede (*on-grid* ou *grid-tie*) e ainda podem ser os que combinam uma ou mais fontes, quando são determinados como sistemas híbridos. No sistema conectado à rede a potência gerada pelo sistema fotovoltaico é entregue diretamente à rede elétrica. Nesse sistema é indispensável o uso de um inversor que faça o controle da qualidade e segurança do sistema elétrico (PINHO; TAVARES, 2014). A Figura 8 representa um exemplo de sistema conectado à rede.

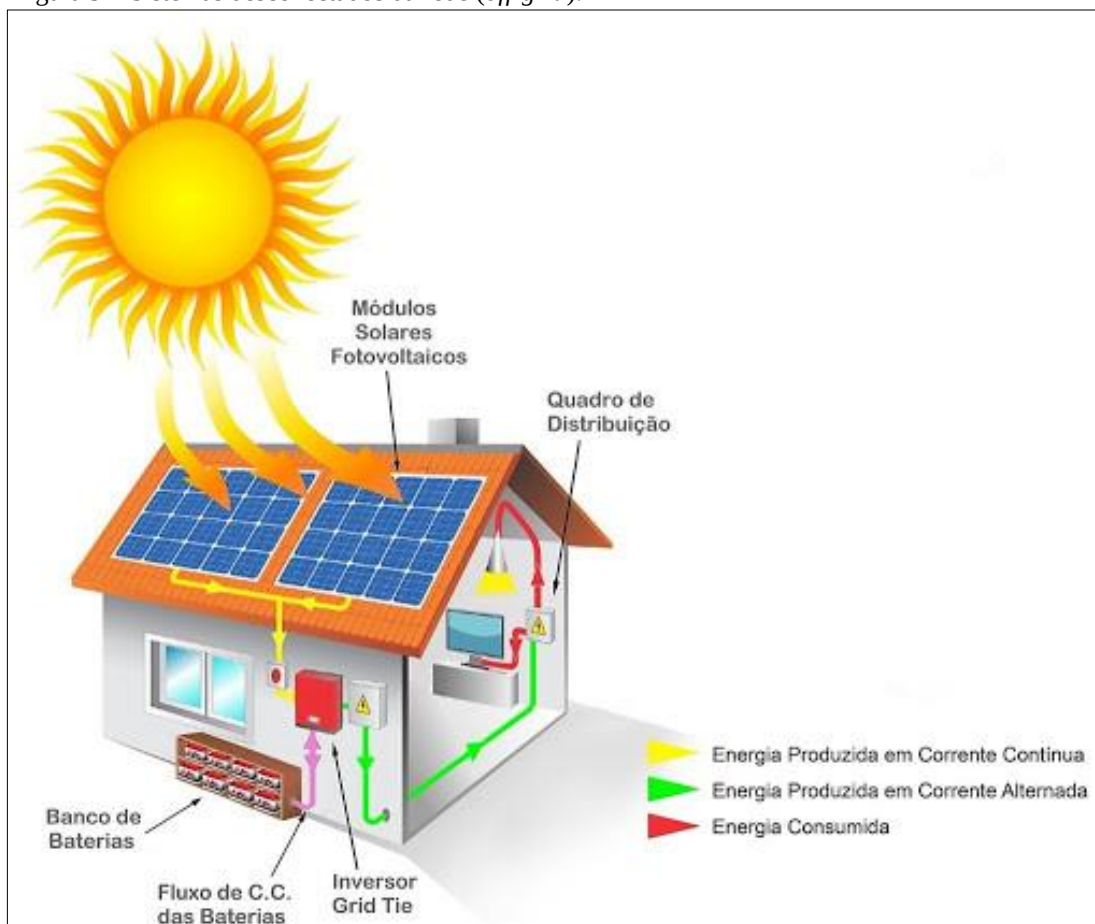
Figura 8 – Sistemas conectados à rede (*on-grid* ou *grid-tie*).



Fonte - Etatesla (2020).

Os sistemas autônomos, denominados *off-grid*, não ficam conectados à rede de distribuição e geralmente são aplicados em lugares remotos e ou de difícil acesso ou ainda onde o custo de instalação de uma rede convencional fique muito elevado (WEINERT, 2017). Os sistemas isolados normalmente necessitam de armazenamento, em que se utilizam baterias para usar a energia no momento em que não há geração do sistema fotovoltaico. Esses sistemas isolados utilizam uma unidade de controle e conservação de potência que é integrada por um inversor e um controlador de carga (PINHO; TAVARES, 2014). A Figura 9 mostra um exemplo de um sistema isolado.

Figura 9 – Sistemas desconectados da rede (*off-grid*).

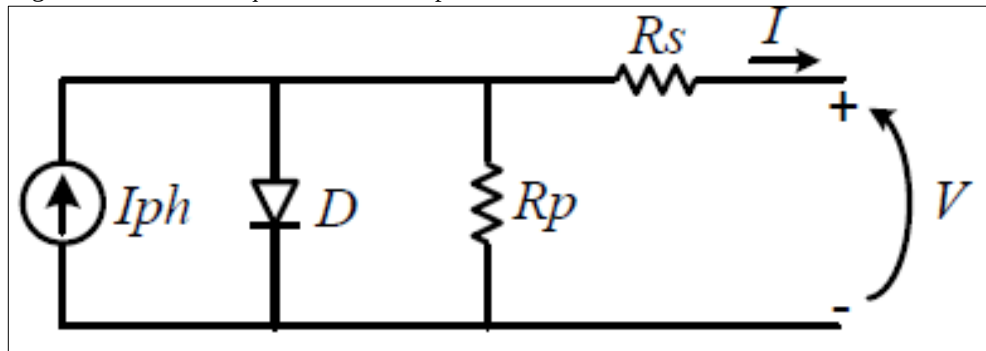


Fonte - Etatesla (2020)

2.2.5 Propriedade de um Painel Fotovoltaico

As propriedades fundamentais de um painel fotovoltaico podem ser extraídas por intermédio de aproximações matemáticas. É o caso do circuito da Figura 10, que descreve um modelo matemático simplificado para um painel, onde I_{ph} refere-se a corrente gerada, D é o diodo R_p a resistência paralela e R_s a resistência série.

Figura 10 – Circuito equivalente de um painel fotovoltaico.



Fonte - Sampaio (2010).

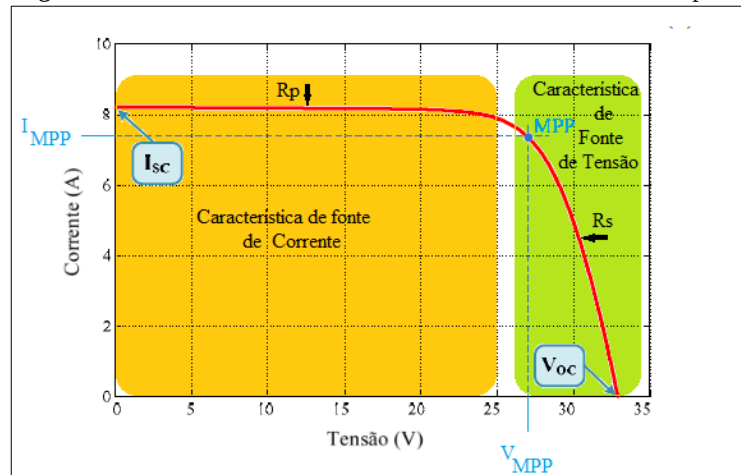
Conforme Sampaio (2010), o modelo matemático que representa o circuito simplificado de um painel fotovoltaico é o que consta na equação 2.1 (SAMPALIO, 2010).

$$I = -I_{ph} - I_r \left(e^{q \frac{V + I \cdot R_s}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

- V, I - Tensão e corrente nos terminais de saída de uma célula solar;
- I_{ph} - Fotocorrente;
- I_r - Corrente de saturação reversa da célula;
- R_s , R_p - Resistência série e paralela da célula;
- q - Carga do elétron, $1,6 \cdot 10^{-19}$ C;
- η - Fator de qualidade da junção p-n;
- k - Constante de Boltzmann, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K;
- T - Temperatura ambiente, K.

Sendo que as variáveis I_{ph} e I_r dependem de vários fatores como: energia de banda proibida, tensão de circuito aberto por célula, temperatura de referência, temperatura de curto circuito, intensidade de radiação solar, corrente de curto-circuito por célula. Com a equação básica do circuito do painel fotovoltaico é possível traçar a curva característica de tensão e corrente da célula, que é dependente dos valores de R_s e R_p e dos padrões de temperatura e da radiação que atingem o painel fotovoltaico, conseguindo assim mostrar no gráfico da Figura 11 a curva com o ponto máximo de referência entre a corrente I e a tensão V do módulo.

Figura 11 – Curva da Corrente e Tensão de um valor dado de R_p e R_s .



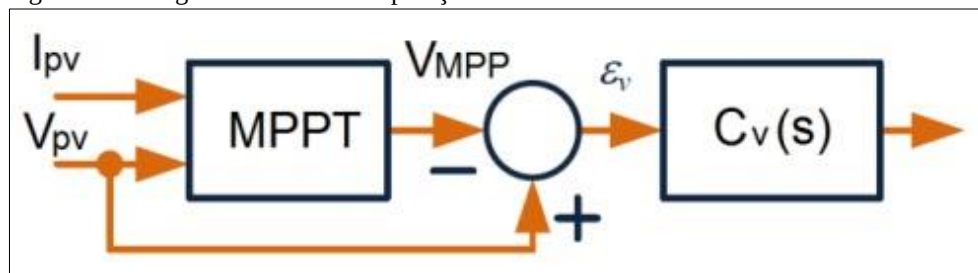
Fonte - Sampaio (2010).

Segundo Sampaio (2010), existem vários pontos de máxima potência que são vistos pelas curvas geradas dos diferentes dados extraídos de um painel fotovoltaico, que são fornecidos pelos parâmetros próprios ou externos, a resistência R_s ajusta a inclinação da curva depois do valor do ponto de máxima potência (MPP – *Maximum Power Point*), aonde o painel fotovoltaico vai atuar como uma fonte de tensão, já a resistência R_p faz a inclinação anteriormente ao valor do MPP, na faixa onde o módulo age como uma fonte de corrente. Sendo assim fundamental determinar a corrente requerida ao painel em razão dos seus parâmetros, podendo se utilizar a técnica de MPPT.

2.3 Rastreamento MPPT Perturba e Observa (P&O)

O MPPT é essencial em um sistema de geração FV, visto que se destina a trabalhar com alto rendimento o tempo todo nas diferentes condições de temperatura e irradiação solar que ocorre com o sistema de geração fotovoltaica. Nesse sentido, a Figura 12 mostra um exemplo de controle para se obter o MPPT, onde o seguidor fornece uma referência de tensão que é entregue ao regulador em amplitude, sendo que essa referência é a representação da localização do ponto de máxima potência (DE OLIVEIRA, 2016).

Figura 12 – Diagrama de bloco da operação de rastreamento do MPPT.

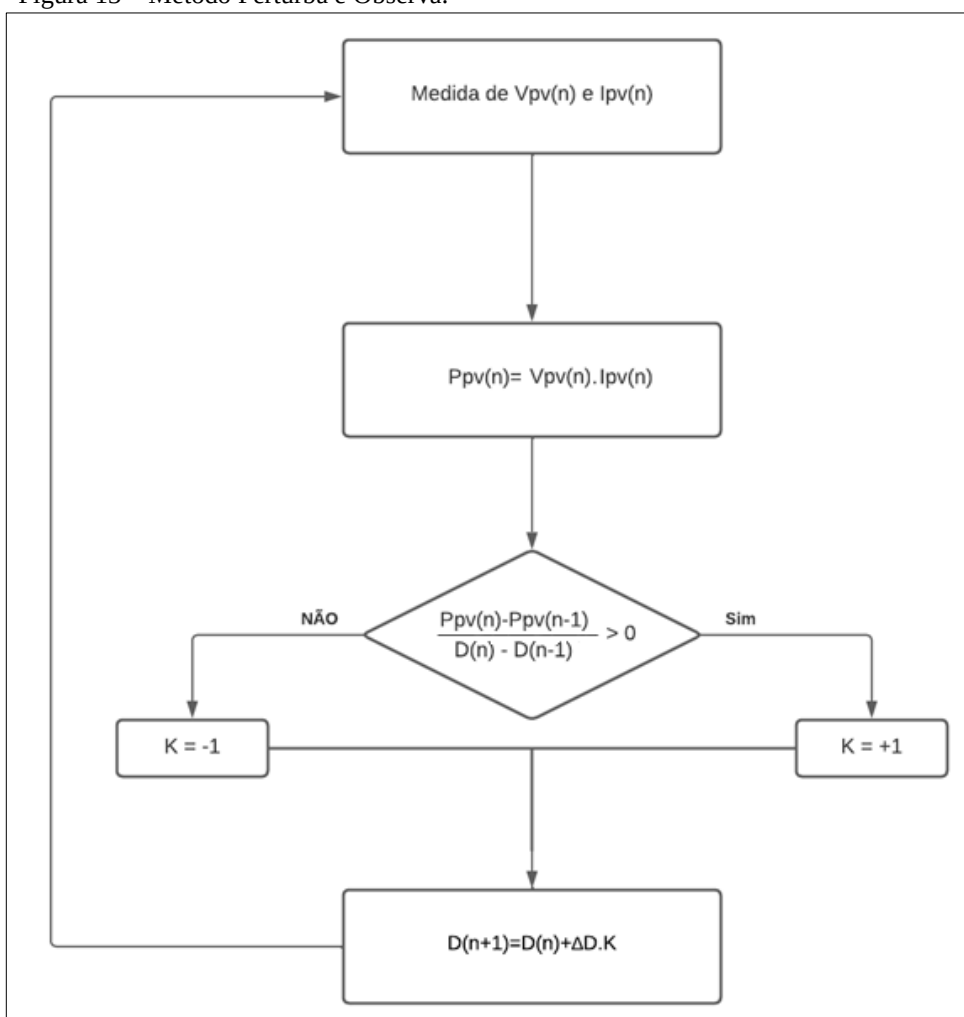


Fonte - De Oliveira (2016).

A característica de tensão e corrente da célula solar não é linear e muda com a irradiação e a temperatura. Normalmente só existe um ponto na curva tensão ou corrente e potência, a qual é chamada de *Maximum Power Point* (MPP), no qual todo o sistema solar fotovoltaico trabalha com eficiência máxima e produzindo uma máxima potência de saída. Os modelos de cálculos ou algoritmos de pesquisa acham a posição do MPP que não é conhecida, e as técnicas de MPPT são utilizadas para manter o ponto de operação do arranjo fotovoltaico em seu MPP. (DOLARA et al., 2009).

Segundo Dolara et al., (2009), existem uma grande quantidade de métodos de MPPT, que nos últimos anos foram estudados e aplicados em sistemas fotovoltaicos, alguns dos métodos de MPPT mais comuns usados na literatura como exemplo são: Perturba e Observa (P&O), Condutância Incremental (IC), Lógica Fuzzy e a Rede Neural Artificial. Sendo as técnicas P&O e IC as mais utilizadas. O fluxograma da Figura 13 apresenta o método do perturba e observa.

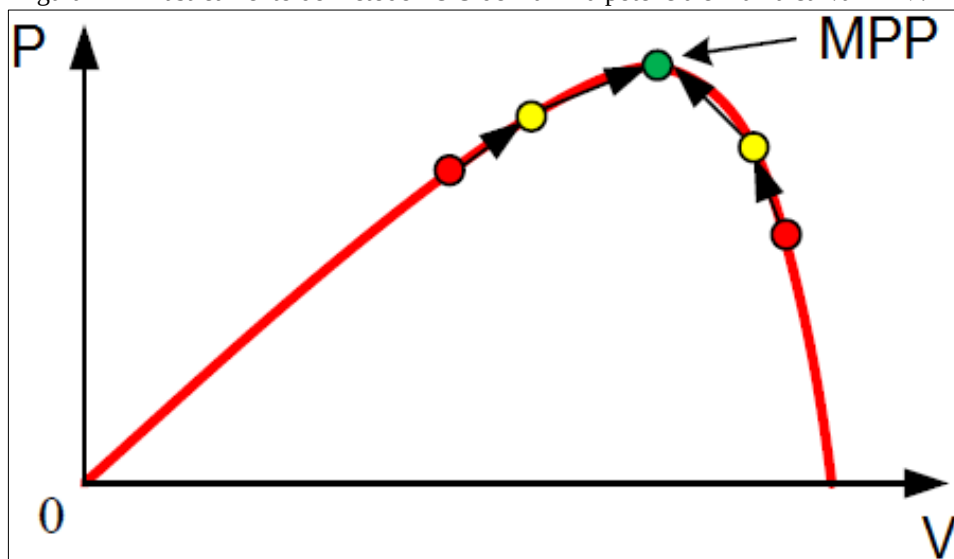
Figura 13 – Método Perturba e Observa.



Fonte - Adaptado de DOLARA et al., (2009).

Segundo Esmar e Chapman (2007), o método P&O resume-se em simplesmente gerar uma perturbação na tensão ou na corrente do PV, e após observar o seu comportamento na saída, a atividade de rastreamento do algoritmo é representado em um esboço na Figura 14.

Figura 14 - Rastreamento do método P&O de máxima potência em uma curva $P \times V$.



Fonte - Mattos (2011).

O rastreamento do MPP é feito incrementando e decrementando a tensão de referência do conversor CC-CC, e observando a saída obtém-se novo sentido de perturbação. Já quando há um aumento na potência seguida da perturbação então precisa ser mantida a mesma direção para que seja obtido o ponto de máxima potência, e da mesma maneira quando a potência diminuir a direção da perturbação tem que ser alterada (DE OLIVEIRA, 2016).

2.4 Sistema de Baterias e Carregadores

O Sistema de armazenamento com baterias se faz necessário na utilização de fontes de energias renováveis, onde esses sistemas intermitentes necessitam de acúmulo para que a carga possa usar a energia elétrica em modo estável e contínuo sendo no momento em que é gerado ou posteriormente na falta dessa geração (LUNA FILHO, 2017).

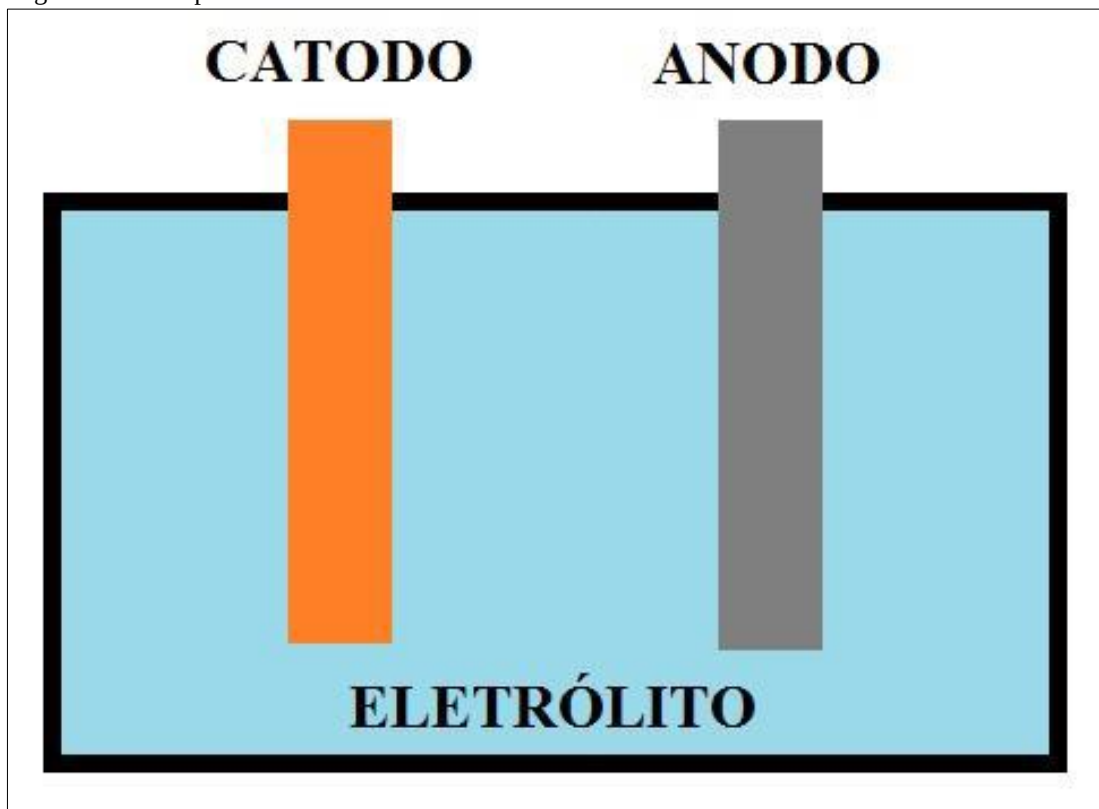
2.4.1 Sistema de Baterias

As baterias são dispositivos que resumidamente convertem energia química em energia elétrica, na forma de corrente contínua, no momento em que está no processo de descarga, já no estado de carga ela converte a energia elétrica em energia química (ADÃO, 2013).

Uma bateria é criada a partir de uma ou mais células eletroquímicas que são ligadas em série ou paralelo, ou também pode ser uma combinação destas. Nessas células é originada a

energia elétrica através da acumulação da energia química ali contida, que se transforma a partir das reações eletroquímicas, os seus eletrodos fornecem corrente para as cargas externas e são denominados de ânodo (polaridade negativa) e de cátodo (polaridade positiva), que são separados por um eletrólito como representa a Figura 15 (PORCIUNCULA, 2012).

Figura 15 – Componentes básicos de uma célula de bateria.



Fonte - MICHELINI (2017).

Segundo Bocchi (2000), existem dois tipos de baterias: as primárias que são as não recarregáveis e as secundárias que são as baterias recarregáveis, que podem ser reutilizadas muitas ou até milhares de vezes, as principais baterias comercializadas no mercado nacional são: cádmio/óxido de níquel (níquel/ cádmio), chumbo/ óxido de chumbo, (chumbo/ ácido), hidreto metálico/ óxido de níquel e íons lítio. Essas baterias são usadas em aplicações que necessitem de alta potência (maiores correntes elétricas em um menor tempo).

As baterias seladas VRLA (*Valve Regulated Acid* – bateria chumbo-ácido regulada por válvula), podem ser encontradas de dois tipos as de eletrólito gel e as de eletrólito absorvido nos separadores. Foi nos anos 70 que pesquisadores desenvolveram as baterias de chumbo ácido que são livres de manutenção e reguladas por válvula, que podiam funcionar em qualquer posição. Esses tipos de bateria admitem a recombinação de uma grande parte dos gases gerados no seu funcionamento, o que resulta em baixas perdas de água, elas são usadas principalmente

em aplicações estacionárias em telecomunicações e nobreaks (CHAGAS, 2007). A Figura 16 apresenta algumas características das principais baterias encontradas no mercado.

Figura 16 – Comparativo entre os tipos de baterias.

Especificações	Chumbo Ácido	NiCd	NiMH	Li-ion		
				LCO ¹	LFP ²	LTO ³
Energia Específica (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	150-200	90-120	70-80
Vida Útil (Ciclos Completos)	200-300	1000	300-500	500-1000	1000-2000	3000-7000
Tempo de Carga	8-16h	1-2h	2-4h	2-4h	2-4h	2-4h
Tolerância a Sobrecarga	Alta	Moderada	Baixa	Baixa		
Autodescarga por mês	5%	20%	30%	<5%		
Tensão Nominal por Célula	2 V	1,2 V	1,2 V	3,6 V	3,2-3,3 V	2,4 V
Manutenção	3-6 meses	Descarga completa a cada 90 dias		Livres de manutenção		
Toxicidade	Muito alta	Muito alta	Baixa	Baixa		
Custo	Baixo	Moderado		Alto		

Fonte - Eletrônica De Potência (2022).

Segundo Michelinini (2017), as vantagens das baterias de chumbo-ácido, Figura 17, são que elas têm menor custo de mercado, elas já são uma tecnologia madura bem confiável, possui auto descarga e manutenção baixas, não possui memória, que é a perda de capacidade da carga com o seu tempo de uso, e é capaz de suportar altas taxas de descarga, e suas desvantagem é possuir um grande tamanho, não pode ser armazenada sem carga, densidade baixa de energia, permite poucos ciclos de descargas, possui limitação para seu transporte, podem causar danos ao meio ambiente se não forem descartadas corretamente ou acontecerem vazamentos.

Figura 17 - Bateria Selada VRLA.



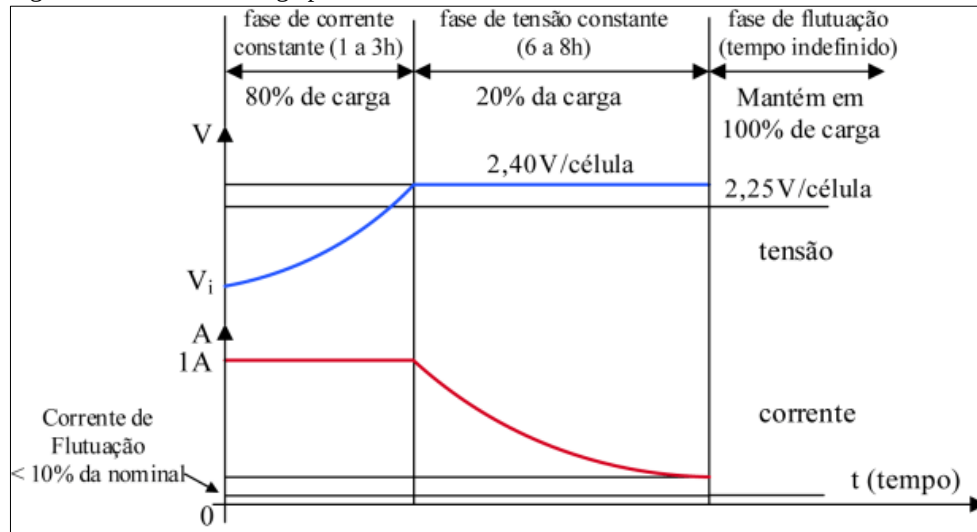
Fonte - Unipower, 2022.

Em novas pesquisa sobre as baterias chumbo-ácido foi descoberto que a adição de carbono na placa negativa das baterias protege contra o acumulo de sulfato, acarretando em um aumento da vida útil da bateria. Outro teste nessas baterias avançadas de chumbo-ácido foi a adição de um super capacitor dentro da bateria, ele fica conectado à placa negativa e age como um *buffer* e coordena as altas taxas de carga e descarga, esses avanços nas bateria-chumbo-ácido poderiam ocupar 25% dos sistemas de potência do mercado global (VIAN et al., 2021).

2.4.2 Carregamento da Bateria Chumbo-Ácido

Segundo Lafuente (2011), o carregamento das baterias chumbo-ácido seladas requer um tempo de carregamento de 12 a 16 horas, em alguns casos pode ser de 36 horas se for um banco de baterias de grande capacidade. A técnica mais apresentada e que visa prolongar a vida útil da bateria se baseia em três estágios, o primeiro usa uma corrente constante por um período de cinco horas, ocasionando a subida da tensão da célula até atingir a tensão nominal, esse ciclo é onde a bateria recebe 70% de sua capacidade. A segunda etapa do carregamento a intensidade da corrente é diminuída gradativamente até o valor em que a célula estará saturada, e é nesse ponto que a célula não permite mais circulação de corrente através da mesma. Nessa etapa a tensão é constante e pode demorar cinco horas, também é esse período que se faz essencial para prolongar a vida útil da bateria. A curvas de carga estão representadas na Figura 18.

Figura 18 - Curva de Carga por Célula de Baterias Chumbo-Ácido.



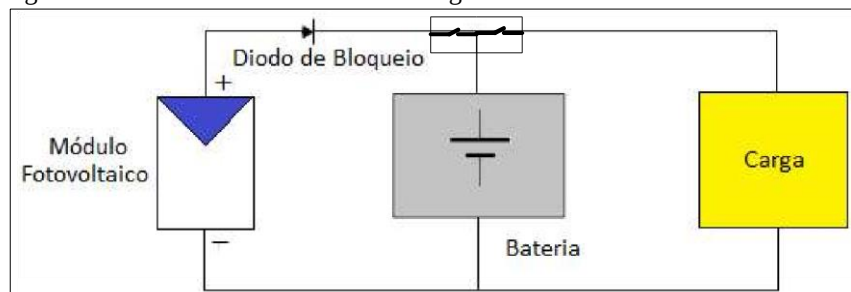
Fonte - Eletrônica De Potência, 2022.

A terceira e última etapa que é chamada etapa de flutuação, baseia-se em injetar uma corrente mínima e uma tensão ondulatória. Essa etapa tem por objetivo a manutenção da tensão de saída da bateria quando a mesma não estiver em uso, para compensar a sua descarga natural.

2.4.3 Carregadores

Segundo Weinert (2017) os carregadores, Figura 19, devem possuir uma carga periódica que possa carregar totalmente uma bateria. Para que um carregador consiga carregar uma bateria selada estacionária de 12V, é necessário que o mesmo supere o valor nominal de 12V da bateria chegando até a 14,8V, isso seria necessário para obter uma diferença de potencial entre a bateria e o carregador, por esse motivo a bateria não deve estar conectada a outras cargas no momento em que está sendo carregada.

Figura 19 – Modelo de controlador de carga.



Fonte – Pinho e Galdino (2014).

O diodo como função de bloqueio evitando o fluxo de corrente da bateria para o módulo, no momento em que o controlador não desempenha esta função (PINHO E GALDINO, 2014)

2.4.3.1 Capacidade e Utilização

As baterias convencionais automotivas não devem ser utilizadas em sistema fotovoltaico, elas foram projetadas para fornecer correntes elevadas em um curto espaço de tempo, e também não suportam descargas profundas. Já as baterias seladas a gel não liberam gases e podem ser montadas em sistemas fechados, elas possuem uma boa vida útil que podem chegar a 10 anos, portanto é uma boa escolha por se tratar de um item que é o primeiro a sofrer desgaste em um sistema fotovoltaico que é projetado para durar 30 anos ou mais. (NEO SOLAR, 2022).

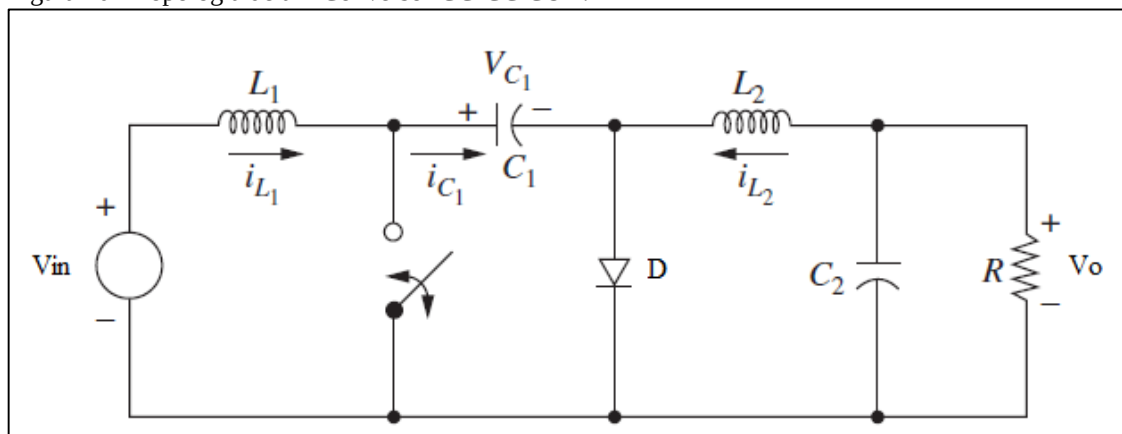
A capacidade de uma bateria calcula-se em Ampère-hora (Ah), multiplicando o produto da corrente, em Ampère (A), pelo tempo, em horas, e ainda necessita da compensação pela temperatura de referência, aquela que é fornecida pelo acumulador e definido regime de descarga, até atingir a tensão final de descarga estabelecida (UNICOB, 2022).

2.5 Conversor CUK

Segundo Hart (2012), os conversores CC-CC são circuitos eletrônicos e tem a função de converter uma tensão CC em diferentes valores de tensão CC, obtendo na saída uma tensão sempre ajustada.

A transformação de uma fonte de tensão CC fixa em uma fonte de tensão CC ajustável é feita por meio de técnicas de chaveamento de dispositivos semicondutores de potência, tais como modulação por frequência (*Frequency Modulation*, FM), modulação por largura de pulsos (*Pulse-Width Modulation*, PWM), entre outras. O processo mais utilizado atualmente é a modulação por largura de pulsos (PWM) (ARRABAÇA; GIMENEZ, 2013).

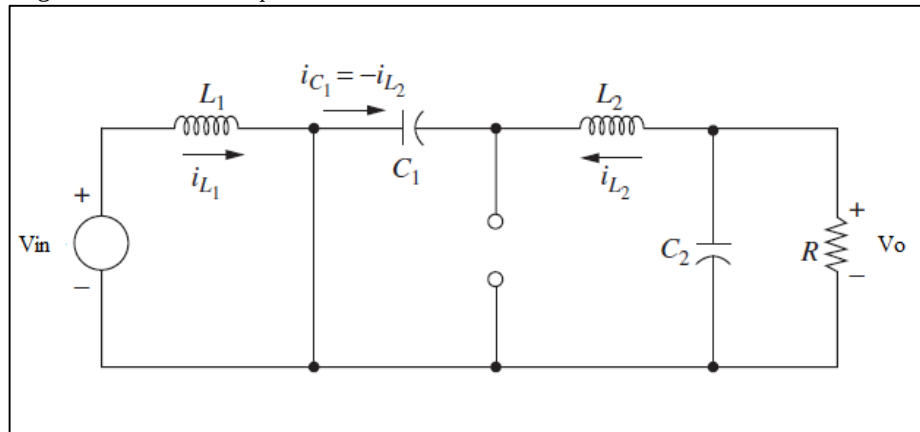
Figura 20 - Topologia de um Conversor CC-CC CUK.



Fonte - Adaptado De Hart (2012).

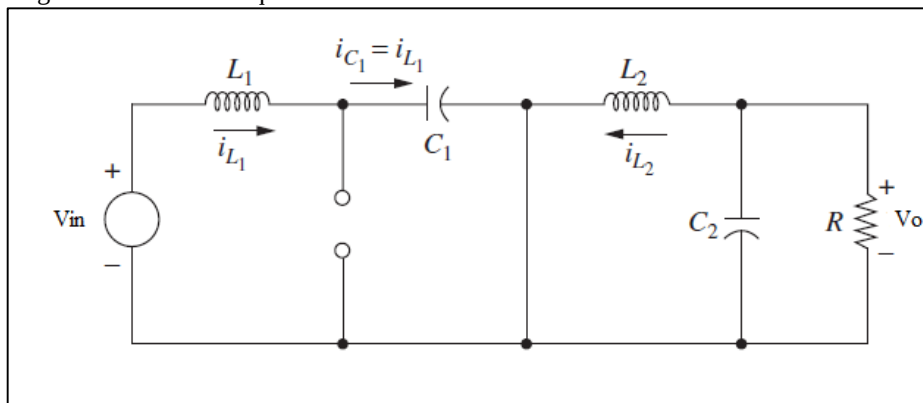
No conversor CUK, Figura 20 a tensão de saída pode ser ajustada tanto num valor menor quanto num maior que a entrada, e a saída do conversor tem sua polaridade invertida em comparação a sua entrada. O indutor de entrada tem a função de um filtro para a alimentação CC impedindo assim um conteúdo harmônico grande. A transferência de energia no conversor CUK se dá através de um capacitor C_1 . Suas características para análise do conversor CUK são: Os alto valores para os indutores e suas correntes constantes, os valores dos dois capacitores são altos e suas tensões são constantes, o circuito funciona no modo estável e suas formas de onda da tensão e corrente são periódicas, como mostra a Figura 23, em uma taxa de trabalho D , a chave está fechada, Figura 21, em um tempo DT e fica aberta, Figura 22, num $(1-D)T$, e a chave e os diodos são ideais (HART, 2012).

Figura 21 - Circuito Equivalente do Conversor CUK com Chave Fechada.

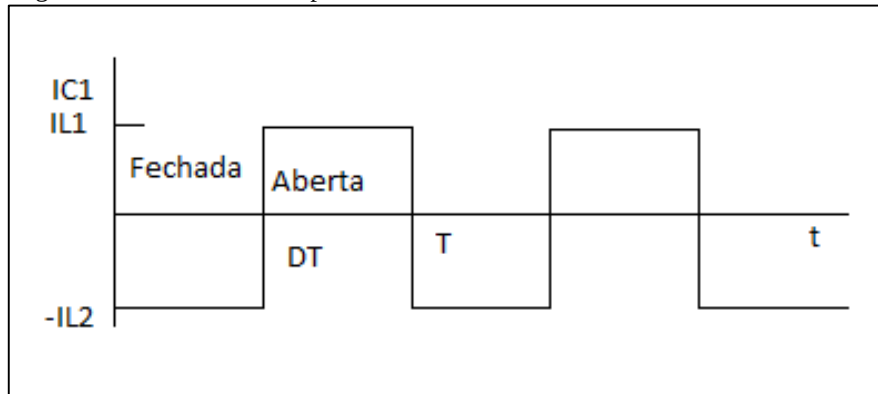


Fonte – Adaptado de Hart, 2012.

Figura 22 - Circuito Equivalente do Conversor CUK com Chave Aberta.



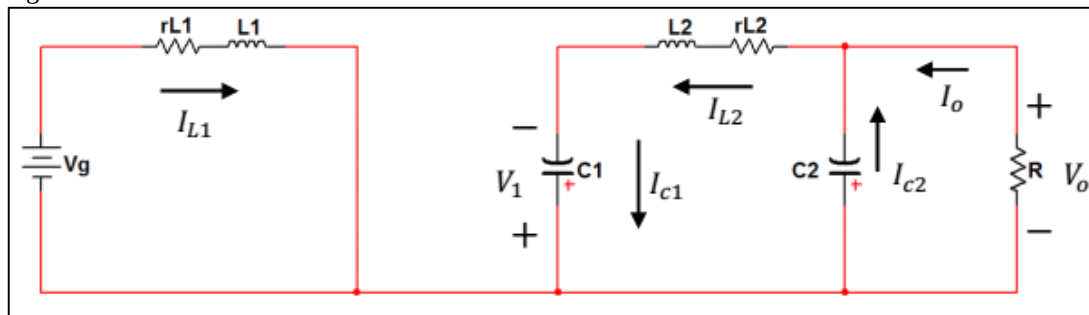
Fonte – Adaptado de Hart, 2012.

Figura 23 - Corrente em IL para uma Indutância Alta.

Fonte – Adaptado de Hart, 2012.

Segundo Santos (2015), o conversor CUK trabalha em duas condições distintas que são definidas pela posição da chave semicondutora que compõem o circuito, ele pode funcionar em condução descontinuo que é quando o capacitor está em completa descarga, já no modo contínuo a tensão no capacitor não se anula. No modo de trabalho contínuo do conversor CUK o ganho da tensão depende só da relação cíclica, já no modo descontinuo ele depende também da frequência de comutação e da resistência da carga. Na Figura 24 temos um exemplo de um conversor com chave fechada atuando em modo de condução contínuo, e na Figura 25 o conversor em modo de condução continua com a chave aberta respectivamente.

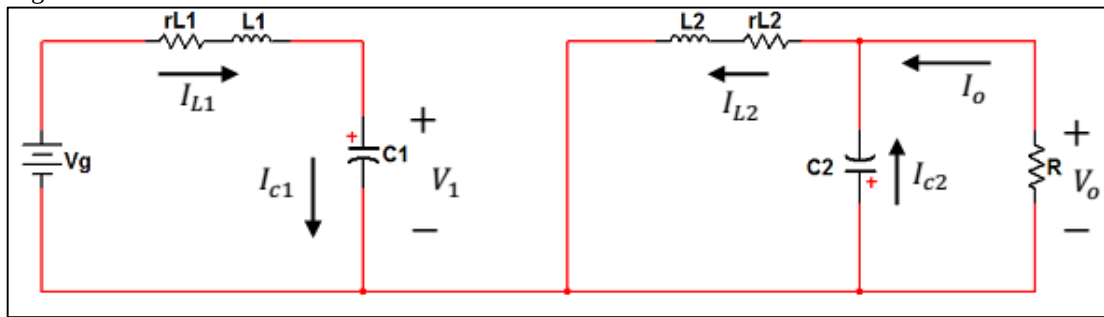
Figura 24 - Circuito conversor CUK com chave fechada.



Fonte – Santos, 2015.

Com a chave fechada, a fonte está armazenando energia no indutor $L1$ e o capacitor $C1$ com uma tensão $V1$ vai transferir a energia pelo indutor $L2$ para alimentar a carga, nesse momento o diodo $D1$ não conduz, porque ele está reversamente polarizado pela tensão $V1$ do capacitor $C1$ (SANTOS, 2015).

Figura 25 - Circuito conensor CUK com chave aberta.



Fonte – Santos, 2015.

Com a chave aberta o diodo D1 fica polarizado diretamente e a corrente de I_{L1} carrega o capacitor C1 com uma tensão maior que a da fonte de entrada, já a energia que alimenta a carga é fornecida pelo indutor L2 (SANTOS, 2015).

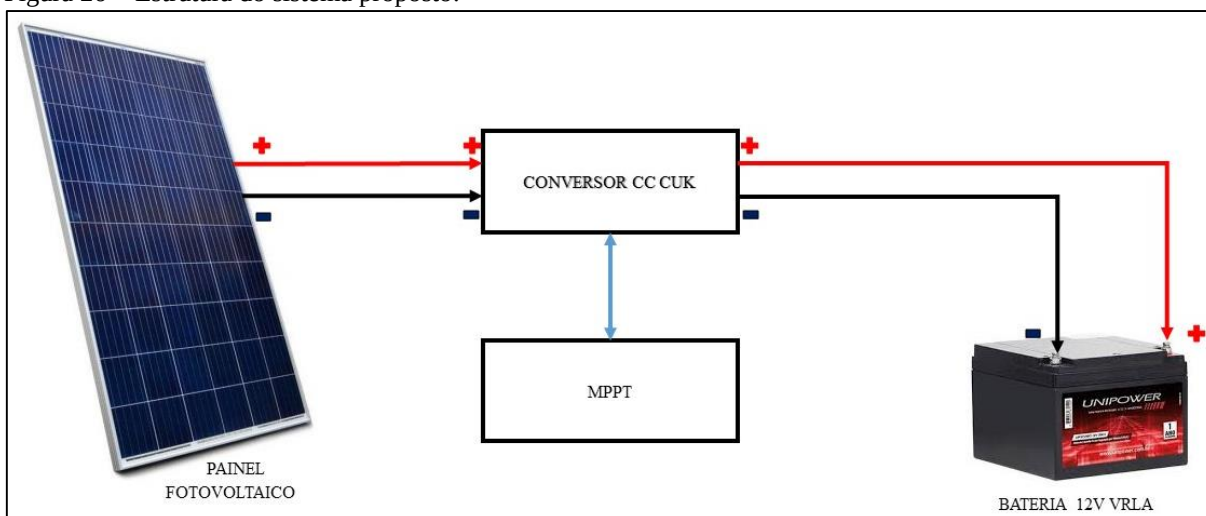
3 METODOLOGIA

O projeto do conversor CUK será implementado nesse trabalho com o intuito de fornecer energia elétrica de 12V para uma carga em local remoto, o sistema vai utilizar uma bateria VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*) 12V/7A UNIPOWER, que é uma bateria selada e a gel que não emite gases, nem causa vazamentos e é montada com válvulas que regulam a pressão para proteção contra explosões, que vai servir para o armazenamento de energia gerada pelo PV. O sistema do PV isolado com a instalação da bateria terá autonomia para funcionar ininterruptamente nos momentos em que a baixa incidência de luz solar, dias nublados ou a noite a geração de energia do PV não é suficiente para manter a carga em pleno funcionamento.

A escolha do conversor CUK se deu a partir das características de controlar o fluxo de energia CC entre a entrada e a carga mantendo as características de uma fonte CC, o mesmo possui reduzidas ondulações de corrente na entrada e na saída, podendo ser ainda mais reduzidas com o acoplamento dos indutores. O conversor CUK vai funcionar como uma fonte CC controlando a energia gerada pelo PV e inserindo na bateria.

A estrutura do sistema a ser implementado, Figura 26, é composto por um gerador PV interligado ao conversor CUK CC-CC que por sua vez será ligado a um acumulador a bateria de 12V, onde o conversor CUK vai ser controlado pelo circuito MPPT, o MPPT vai controlar a carga da bateria limitando a tensão da saída em 13,8V, o PV fornece uma tensão média de 16,6V, mas independente da tensão que o PV estiver gerando no momento o conversor CUK irá estabilizar a tensão em 13,8V de uma bateria por fluxo de corrente.

Figura 26 – Estrutura do sistema proposto.



Fonte – Elaborado pelo autor.

3.1 Conversor CUK

Para iniciar o projeto, é necessário conhecer algumas características de funcionamento das grandezas do circuito. Sabendo que a tensão média no capacitor C1 é calculada pela lei de Kirchhoff das tensões em torno da malha mais externa. A tensão média nos indutores é zero para o funcionamento no estado estável, resultando em:

$$V_{C1} = V_S - V_O \quad (3.1)$$

Enquanto a chave permanecer fechada no oscilador, o diodo permanece aberto e não conduz corrente elétrica, dessa forma a corrente no capacitor C1 é a mesma que a do indutor L2, assim:

$$I_{C1(chave\ fechada)} = -I_{L2} \quad (3.2)$$

Porém durante o período que a chave permanecer aberta, a corrente dos dois indutores força o diodo à condução e assim a corrente elétrica no capacitor C1 é igual a corrente no indutor L1:

$$I_{C1(chave\ aberta)} = I_{L1} \quad (3.3)$$

Em seguida, desconsiderando as perdas do projeto e sabendo a potência média fornecida pela fonte deve ser igual à potência média absorvida pela carga, temos:

$$P_i = P_o$$

$$-V_O \cdot I_{L2} = V_I \cdot I_{L1} \quad (3.4)$$

Para um funcionamento contínuo e periódico da chave osciladora, a corrente média no capacitor C1 é aproximadamente zero, dessa forma;

$$I_{C1(chave\ fechada)} \cdot DT + I_{C1(chave\ aberta)} \cdot (1 - D)T = 0 \quad (3.5)$$

Substituindo as equações (3.2) e (3.3), obtemos:

$$-I_{L2} \cdot DT + I_{L1} \cdot (1 - D)T = 0$$

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = -\frac{D}{1 - D} \quad (3.6)$$

Conhecendo a equação 3.4 e manipulando matematicamente as correntes e tensões, dessa forma é obtido a equação:

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = -\frac{V_o}{V_i} \quad (3.7)$$

Combinando as equações (3.6) e (3.7), obtém-se a tensão de saída em relação a tensão de entrada e a taxa de trabalho do conversor.

$$V_o = -V_i \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (3.8)$$

O sinal negativo da equação 3.8 indica que a polaridade de saída é invertida em relação à entrada. Manipulando essa equação, pode-se obter diretamente a taxa de trabalho do conversor.

$$D = -\left(\frac{V_o}{V_i - V_o} \right) \quad (3.9)$$

Segundo Hart (2012), a variação de tensão de saída é encontrada pela equação:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = -\frac{1-D}{8L_2C_2f^2} \quad (3.10)$$

A ondulação no capacitor C1 segundo Hart (2012) é obtida pelo cálculo da variação de tensão no capacitor C1 enquanto a chave permanece aberta e as correntes no indutor L1 e no capacitor C1 são iguais. Supondo que a corrente em no indutor L1 seja constante e usando as equações (3.7) e (3.8), resulta na equação:

$$\Delta V_{c1} \approx \left(\frac{V_o D}{RC_1 f} \right) \quad (3.11)$$

As flutuações nas correntes do indutor podem ser calculadas observando-se as tensões em cada indutor enquanto a chave permanece fechada. Nesse intervalo, a variação na corrente do indutor L1 é:

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_i D}{L_1 f} \quad (3.12)$$

O cálculo se repete para o a variação de corrente no indutor L2:

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_i D}{L_2 f} \quad (3.13)$$

Manipulando a equação 3.12 e pode-se obter o valor do indutor L1.

$$L_1 = \frac{V_i D}{\Delta i_{L1} f} \quad (3.14)$$

O cálculo se repete para o indutor L2:

$$L_2 = \frac{V_i D}{\Delta i_{L2} f} \quad (3.15)$$

Para calcular a resistência equivalente da carga é utilizada a lei de Ohm sobre os valores de tensão e potência de saída do conversor, onde:

$$R = \frac{V_o^2}{P_{out}} \quad (3.16)$$

A partir da equação 3.11 e 3.16 pode-se obter o valor do capacitor C1 isolando esta variável. Assim:

$$C_1 \geq \left(\frac{V_o D}{R \Delta V_{c1} f} \right) \quad (3.17)$$

Pela especificação da ondulação de saída da equação 3.10, manipulando matematicamente e isolando a variável do capacitor C2, pode-se calcular a segunda capacitância do conversor, a partir da equação:

$$C_2 = - \frac{1 - D}{(\Delta V_o / V_o) 8 L_2 f^2} \quad (3.18)$$

Após calcular todos os valores do conversor é necessário realizar as simulações para validar os valores encontrados. É também possível fazer a simulação do painel fotovoltaico e a integração entre painel e conversor, utilizando o rastreamento de máxima potência no método adotado para este trabalho.

3.2 Simulação utilizando *software* PSIM

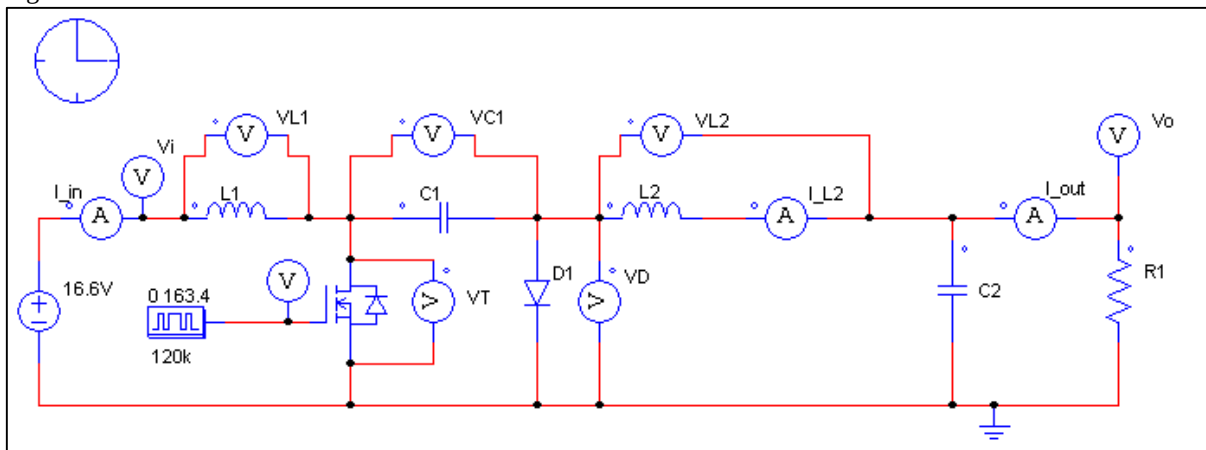
As simulações são divididas em três etapas e todas elas são executadas dentro do *software* PSIM. Primeiramente é simulado o conversor CUK com uma fonte fixa. Na segunda etapa é implementado a simulação do painel fotovoltaico baseado nos dados do fabricante. E por fim é realizado a integração do circuito com o painel fotovoltaico, o conversor e ainda a realização do controle por meio do MPPT.

3.2.1 Simulação do Conversor CUK

Com o conversor projetado são realizadas as simulações para verificar o seu comportamento, mas ainda sem a implementação do MPPT. A ideia inicial dessa etapa é validar

o seu funcionamento e confirmar a similaridade entre as simulações e os cálculos executados no projeto. Para realizar essa simulação do conversor da Figura 27, é adicionado ao circuito uma fonte de tensão contínua de 16,6V, essa informação é retirada do *datasheet* fornecido pelo fabricante. A razão cíclica de trabalho é retirada dos cálculos do projeto e implementada na simulação.

Figura 27 - Circuito simulado conversor CUK.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

Os valores dos componentes do projeto foram dimensionados para obter na saída do conversor a tensão de saída de 13,8V, como a polaridade de tensão de saída é invertida, a tensão desejada é de -13,8V.

3.2.2 Simulação do Painel fotovoltaico

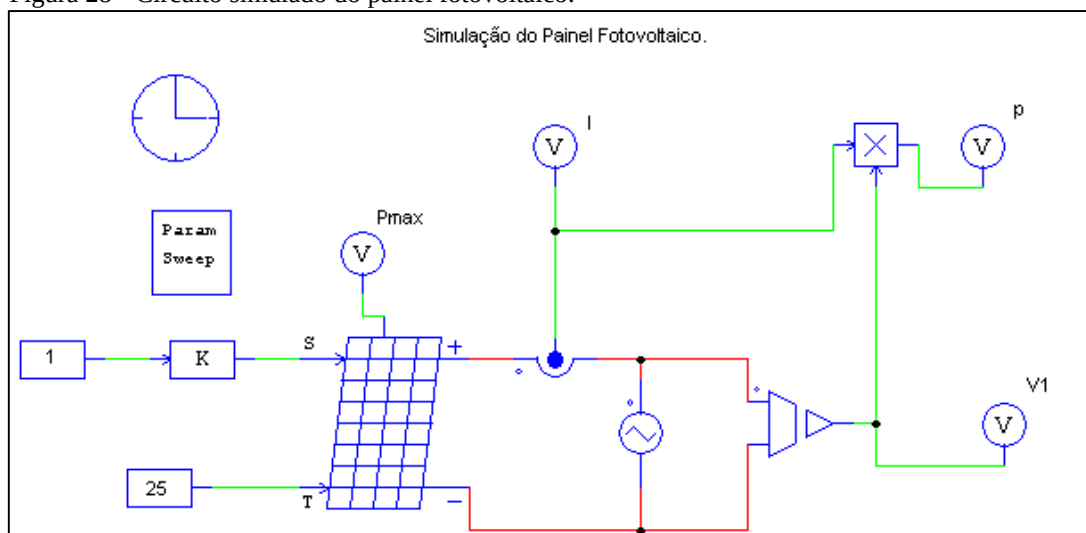
Para simular o módulo fotovoltaico, Figura 28 foi escolhido o modelo elétrico disponibilizado no PSIM. Primeiramente é adicionado ao *software* os parâmetros disponibilizados do painel fotovoltaico. Esse por sua vez calcula os parâmetros não fornecidos pelo fabricante. Nessa etapa é utilizado inicialmente as condições padrão de teste (STC) também encontradas no *datasheet* do equipamento para validar a simulação. Em seguida os valores da irradiação e temperatura são alterados para uma análise de comportamento do painel.

As principais características do painel fotovoltaico são:

- Máxima Potência (Pm): 20 W
- Tensão de Máxima Potência (Vm): 16.6V
- Corrente de Máxima Potência (Im): 1.20 A
- Tensão de Circuito Aberto (Voc): 21.4 V
- Corrente de Curto-Circuito (Isc): 1.31 A
- Tensão Máxima do Sistema: 50 V

- Eficiência do Pannel: 15%
- Coeficiente de Temperatura da Potência (Pm): $-0,45 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$
- Coeficiente de Temperatura da Corrente (Isc): $0,06 \text{ A}/^{\circ}\text{C}$
- Coeficiente de Temperatura da Voltagem (Voc): $-0,37 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$
- Temperatura Nominal de Operação de Célula: $46 \pm 2^{\circ}\text{C}$

Figura 28 - Circuito simulado do painel fotovoltaico.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

Os ensaios do painel são realizados com a irradiação de $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$ e temperatura de célula de 25°C . As demais características do painel voltaico estão disponíveis no Anexo C deste documento.

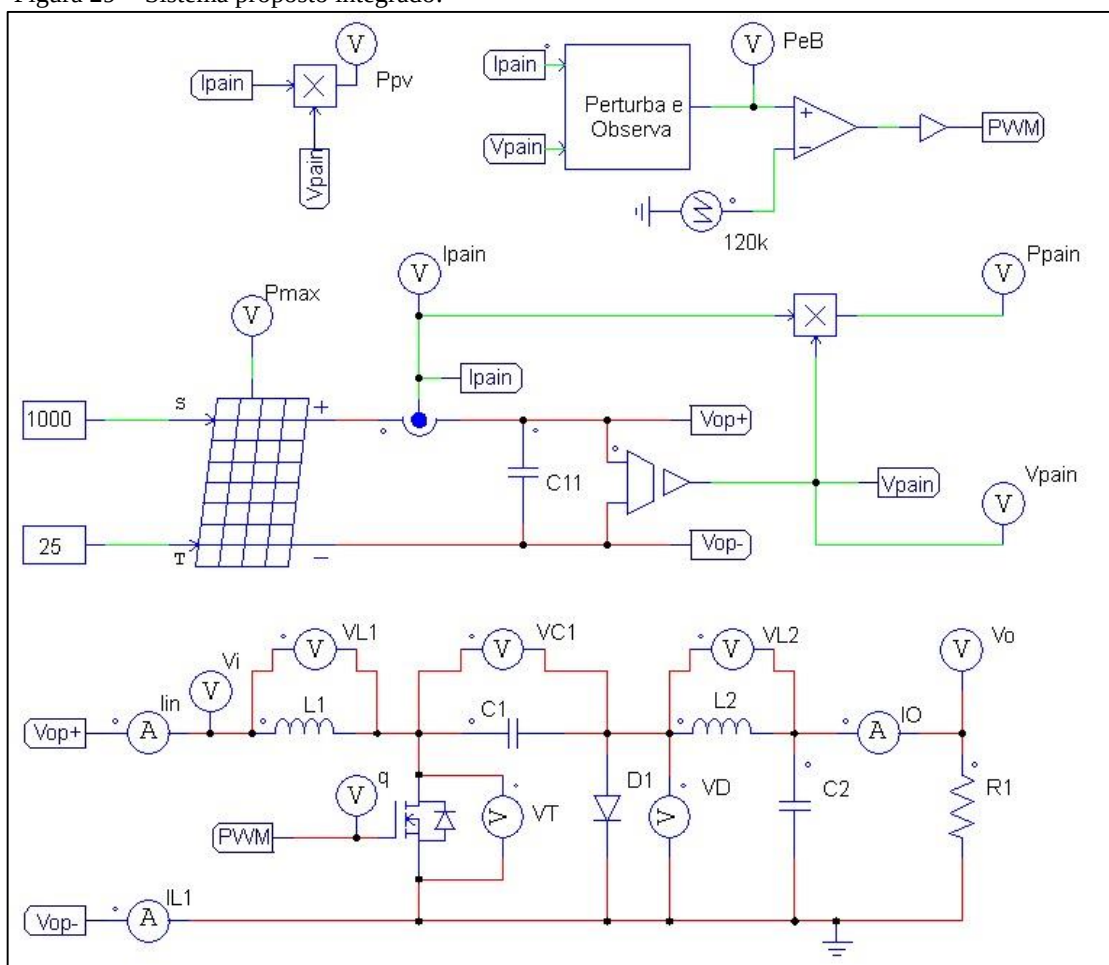
3.2.3 Simulação do sistema integrado ao MPPT

Após ter validado o funcionamento do painel fotovoltaico e também do conversor CUK em simulações isoladas, busca-se agora simular os mesmos utilizando o método de rastreamento P&O. O algoritmo do perturba e observa é o mais utilizado na prática pela sua simplicidade de implementação.

No rastreamento de P&O, a tensão de operação do sistema é perturbada por um pequeno incremento que resulta em uma alteração na potência e esta alteração de potência é medida e registrada. Se houver uma variação positiva, o ponto de operação do sistema é movido para um ponto mais próximo da máxima potência. Se essa variação for negativa o sistema está se afastando do ponto máximo e deve ser reajustado para retornar ao ponto desejado. (STANKIEWICZ, 2013).

Para execução deste método foi realizada a medição da tensão e corrente de saída do módulo fotovoltaico, para determinar a potência do sistema, apresentado na Figura 29. Após, efetua-se uma perturbação na razão cíclica do conversor e verifica-se se a potência obteve ou não um incremento. Caso a resposta seja positiva, repete-se a perturbação no sentido anterior, caso contrário o sistema inverte o sentido da perturbação até ficar oscilando em torno do ponto de máxima potência.

Figura 29 – Sistema proposto integrado.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

A corrente e a tensão simuladas no módulo solar foram lidas pelo bloco de linguagem C do PSIM, onde o MPPT é executado. Após isso é simulado o circuito realizando uma alternância na radiação do painel entre 200 a 1000 W/m² mantendo a temperatura em fixa em 25°C. Em seguida é realizada a análise do MPPT em relação à variação de temperatura, onde é aplicado ao módulo solar uma oscilação da mesma entre 25 e 50°C. O código em linguagem C está disponível no Apêndice A.

3.3 Desenvolvimento dos protótipos

Na elaboração do protótipo do conversor CUK e dos circuitos associados a este trabalho, procurou se utilizar os componentes com níveis de tensões superiores a 35 V, sendo essa a tensão máxima do conversor CUK, que é adquirida entre a soma da entrada V_i mais a saída do conversor V_o .

3.3.1 Capacitor, Diodo, Indutor e Mosfet

Para os capacitores C1 e C2 foram utilizados os parâmetros e os cálculos citados no capítulo 3, foi utilizado o valor comercial mais próximo e maior ao do valor calculado, para o capacitor C1 que no cálculo era 3,6 μF utilizei então 4,7 μF por 63V e 105 °C, já o capacitor C2 o cálculo era 1,1 μF utilizei o 2,2 μF por 63V e 105°C. Para o diodo conversor foi definido o diodo de superfície Schottky, que é ideal para retificação de baixa tensão e alta frequência o MBR360 que suporta até 60v com uma corrente de 3A, trabalhando assim com o dobro das tensões e correntes anteriormente calculadas e também da frequência já estipulada que é de 120KHZ. Os indutores foram montados em carretel de material plástico baquelite de formato grande com 25mm de largura modelo E25, com 10 terminais vertical e com passo 15mm com núcleo ferrite NEE-25/10/6-260-IP12R, que é o indicado para altas frequências, foi utilizado o fio esmaltado 20 AWG que fornece uma corrente de 1,6A, e utilizando a formula matemática $L=A_l.N^2$ e os parâmetros do núcleo são $A_l=260 \text{ Nh}$, logo o indutor L1 necessita de 48 espiras enquanto o indutor L2 apenas 43 espiras, após a montagem dos indutores os mesmos foram aferidos por um multimedidor Minipa MC-155.

Foi utilizado o transistor MOSFET modelo STP50N06 de canal N que possui uma alta corrente e também alta velocidade de comutação, ele trabalha com tensão de até 60V e uma corrente de até 50A, e pode suportar uma temperatura de operação de até 175°C.

3.3.2 Circuito de controle

Para este circuito é necessário um processador ultra rápido que possa trabalhar com uma frequência já anteriormente estipulada de 120KHZ, para acionar o sinal de PWM do chaveamento do transistor MOSFET. Inicialmente buscou-se os dados do microcontrolador da plataforma Arduino Uno, mas sua frequência máxima de saída PWM não chega aos 120KHZ estipulados no projeto, buscou-se então outro dispositivo o ESP32-WROOM-32D, esse microcontrolador possui dois núcleos de CPU que podem ser controlados individualmente, a CPU dele funciona em uma frequência de clock que pode ser ajustada de 80 MHz a 240 MHz.

O ESP32 integra vários conjuntos de periféricos, desde sensores de toque capacitivo, sensores Hall, interface de cartão SD, Ethernet, SPI de alta velocidade, UART, I2S e I2C o comparativo entre o Arduino Uno e o ESP32 é visto na Tabela 2. (ESPRESSIF, 2022)

Tabela 2 – Comparativo entre Arduino UNO e o ESP32.

Dispositivos	ESP32	Arduino Uno
ADC	18	6
Arquitetura	32 bits	8 bits
Bluetooth	Clássico e BLE	Não
Clock	160 – 240 MHZ	16 MHZ
Corrente	220 mA	40 mA
DAC	2	0
FLASH	16Mb	32KB
GPIO	34	14
Interfaces	SPI, UART, I2S, I2C e CAN	SPI, I2C e UART
Núcleo	2	1
RAM	520 KB	2 KB
WiFi	Sim	Não
Corrente	220 mA	40 mA
DAC	2	0

Fonte - Adaptado de Lobo da Informática, 2022.

O ESP32 é superior em muitos aspectos como visto acima em relação a um Arduino Uno, mas suas diferenças na programação e alimentação são muitas, por exemplo o Arduino Uno tanto na alimentação quanto em valores de níveis e tensão em suas saídas utiliza 5V, já o ESP32 trabalha com tensão menor de apenas 3,3V, isso pode dificultar o acionamento de vários periféricos que precisem de maior tensão de acionamento conectados a saída do ESP32, como também necessita de adequações para níveis de informações de suas variáveis de entrada que agora ira entender uma variação analógica de 0v à 3,3V, valores acima dos 3,3V disso podem danificar o ESP32 para sempre. A pinagem do ESP32 está disponível no Anexo A e Anexo B.

3.3.3 Sistema I/O do ESP32

Os pinos para o processamento das variáveis que serão adquiridas dos sensores que serão necessários como a corrente e a tensão do painel e de tensão da bateria, também será utilizado um pino de saída para o PWM e dois pinos para o display externo, pinos de GND e 3,3 V para alimentação do ESP32, os pinos utilizados estão mostrados na Tabela 3:

Tabela 3 – Pinos do ESP32

Pinos ESP32	Arduino Uno
1 - 15 - 38	Alimentação negativa ESP32
2	Alimentação positiva ESP32
5 – GPIO39	Entrada Tensão da Bateria
6 – GPIO34	Entrada Corrente Painel
7 – GPIO35	Entrada Tensão Painel
26- GPIO04	Saída de PWM para Mosfet
33 - GPIO21	Sinal SDA para Display
36 - GPIO22	Sinal SCL para Display

Fonte - Adaptado de Lobo da Informática, 2022.

O sistema está conectado a um display externo através das portas SDA e SCL, que informara os dados coletados de tensão e corrente do painel, tensão da bateria e o valor do PWM que aciona o MOSFET.

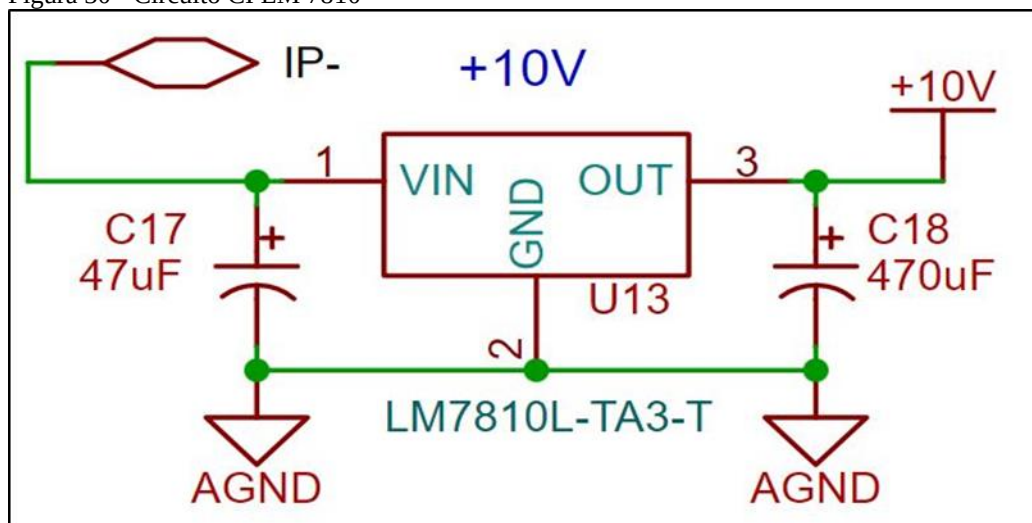
3.3.4 Fonte para alimentação dos circuitos

Uma fonte de alimentação regulável e estável é necessária visto que temos vários circuitos como os drives e sensores de tensão e corrente, também temos o ESP32 que necessita de 3,3 V para trabalhar, e a tensão para a alimentação do ESP32 vai prover de uma bateria de 12V, já a tensão para o circuito do drive do MOSFET vai ser do painel fotovoltaico.

Para uma adequação entre os níveis de tensões necessários e por serem circuitos muito sensíveis utilizou-se três circuitos integrados (CI) reguladores de tensão linear, para operar como um transistor em sua região linear, mantendo assim uma tensão constante de saída, independente da tensão de entrada que está sendo aplicada (FVML, 2019).

Para reduzir e estabilizar a tensão da bateria em 8V é necessário utilizar o CI LM 7808 e o regulador CI LM 7803 para regular a tensão de 3,3V responsável por alimentar o ESP32. Para a alimentação do drive do transistor MOSFET que necessita para o acionamento de seu gate 10V, foi utilizado CI LM 7810, Figura 30, para estabilizar a tensão vinda do painel em 10V.

Figura 30 - Circuito CI LM 7810



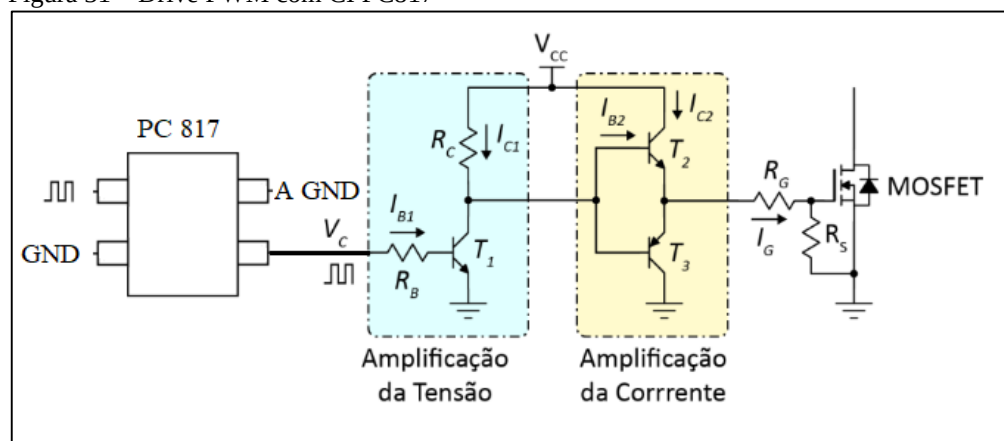
Fonte: Elaborado pelo autor

Em ambas as entradas como as saídas dos CIs LM reguladores foram utilizados capacitores de filtros e diodos em configuração série para reduzir a tensão nos LMs e melhorar a dissipação de calor dos mesmos, conforme solicitado nos seus respectivos datasheet.

3.3.5 Circuito Drive para MOSFET

A partir do fotoacoplador temos o circuito amplificador de tensão e após o circuito de amplificação da corrente até chegarmos ao gate do MOSFET, exemplificada na Figura 31.

Figura 31 – Drive PWM com CI PC817



Fonte: Adaptado de Eletrônica de Potência (2022).

O princípio de funcionamento do circuito drive PWM se dá da seguinte forma, quando um sinal de nível lógico baixo depois do PC 817 faz o transistor T1 entrar em corte enquanto o transistor T2 fica saturado acionando o gate do MOSFET e carregando o capacitor intrínseco, fazendo o MOSFET conduzir, ao contrário acontece quando um sinal de nível lógico alto depois

do PC 817 faz o transistor T1 entrar em saturação, logo o transistor T3 também satura e leva o MOSFET a desligar (ELETRÔNICA DE POTÊNCIA, 2022).

Para o cálculo do resistor de entrada do gate (R_g) do fotoacoplador temos a fórmula, tensão de entrada menos a queda de tensão no diodo que é 1,5 V e corrente de 10 mA dadas pelo fabricante. logo:

$$R_g \leq \frac{3,3V - 1,5V}{10mA} \leq 180 \Omega \quad (4.12)$$

Buscando não trabalhar na corrente máxima do componente, foi estipulado uma corrente de trabalho de 5mA, resultando em uma resistência de 360Ω para ajuste do fotoacoplador.

Para o cálculo do resistor de *gate* do MOSFET, quanto mais tempo de acionamento o MOSFET ficar acionado, mais ele aquecerá, dessa forma para se avaliar a corrente em função da frequência, melhor considerar que a variação de corrente não deverá passar de 1% do período do sinal da onda quadrada que está sendo injetada no gate, logo:

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{120kHz} = 83ns \quad (4.13)$$

Utilizando os dados do datasheet do transistor SFP50N06 temos uma carga máxima no *gate* (Q_g) do MOSFET que é de 45nC logo a corrente máxima pode ser representada por:

$$I_g = \frac{Q_g}{T} = \frac{45 nC}{83ns} = 0,542mA \quad (4.14)$$

Em seguida é utilizada a lei de Ohm para calcular a resistência do gate do MOSFET, obtem-se:

$$R_g \leq \frac{V_g}{I_g} \leq \frac{10V}{0,542mA} \leq 18,45 \Omega \quad (4.15)$$

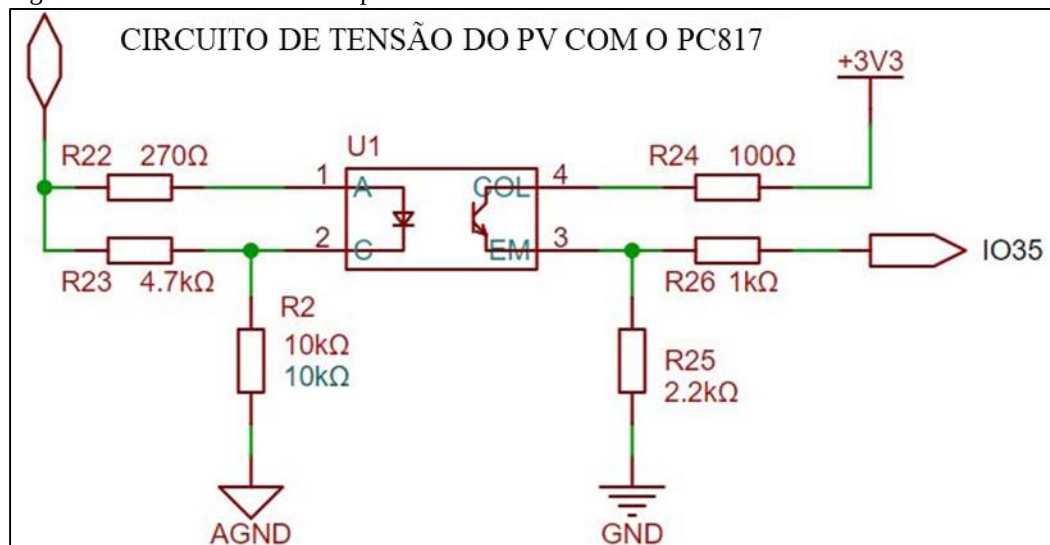
Considerando esse valor como maior a ser utilizado, optei por usar um resistor comercial de 22Ω para evitar trabalhar na corrente máxima do componente eletrônico.

3.3.6 Circuito de Tensão do PV

Como o circuito do PV não possui um GND comum com o ESP32, utilizei então mais um CI PC817 para conseguir isolar os GNDs e informar a tensão de variação do PV, aonde a

configuração usada foi pinos 1 e 2 do CI PC817 foram utilizados para entrada do PV e o pino 3 utilizou-se como a entrada de referencial 3,3V, já o pino 4 é a saída de tensão para a referência do pino 7 o GPIO35 do ESP32. Para o cálculo do resistor de alimentação utilizou-se a corrente do diodo do PC817, que são ligados aos pinos 1 e 2, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante seu valor máximo de corrente é 50 mA. Foram utilizados componentes comerciais que não ultrapassam os limites estabelecidos pelo fabricante. A Figura 32 apresenta a configuração ajustada do fotoacoplador PC817.

Figura 32- Circuito de tensão do painel fotovoltaico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a corrente máxima do fotoacoplador de 50 mA e a tensão de trabalho do ESP32 de 3,3V, calcula-se a resistência:

$$R = \frac{V}{I} \leq \frac{3,3V}{50mA} \leq 66 \, \Omega \quad (4.16)$$

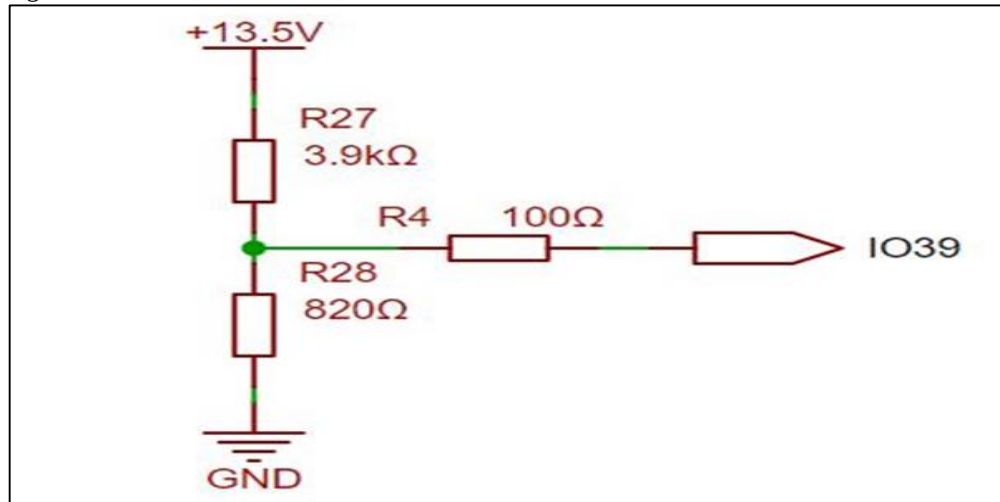
Então utilizou-se o mesmo processo com um potenciômetro em série a um resistor de 66Ω, e após o ajuste, foram fixados os valores de resistores comerciais para implementação e por fim definido o valor 100Ω para a resistência de segurança e o resistor de 1kΩ entre o microcontrolador e o fotoacoplador.

3.3.7 Circuito de tensão da bateria

Para calcular divisor de tensão para que a sua saída não ultrapassasse o valor de 3,3V, que é o máximo suportado pelo microcontrolador, e considerando o limite de carga de 14,5V

fornecido pelo fabricante da bateria, utiliza-se um potenciômetro de $10k\Omega$ para testes em série com um resistor de $3,9k\Omega$. Dessa forma foram encontrados os valores comerciais de resistores de 820Ω e $3,9k\Omega$, representados na Figura 33 do circuito baixo.

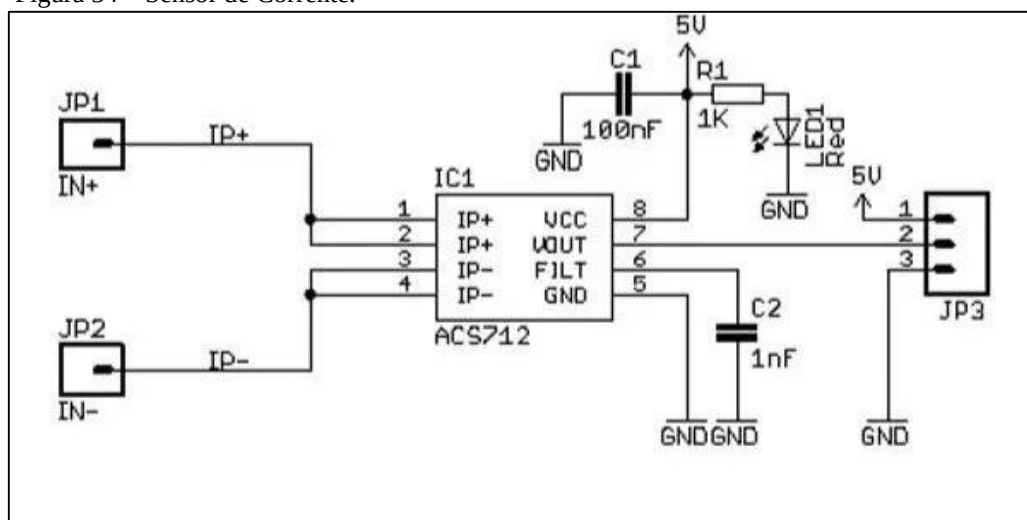
Figura 33 - Circuito divisor de tensão



Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando o valor de corrente para o pino 5 o GPIO39 de entrada analógica e digital do ESP32 é 12 mA fornecida pelo fabricante, foi utilizado um resistor em série depois do divisor de tensão de $1k\Omega$.

Figura 34 – Sensor de Corrente.



Fonte: Easytronics, 2022.

Para o sensor de corrente utilizou-se o ACS 712 de 5A, o mesmo possui a entrada de corrente separada de sua saída pela utilização de um sensor de efeito hall que detecta o campo magnético gerado por uma passagem de corrente, sendo este circuito é o ideal para o conversor CUK.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como finalidade descrever os resultados obtidos a partir dos procedimentos metodológicos adotados. Inicialmente é realizada a simulação do painel fotovoltaico no software PSIM, afim de obter as curvas de potência e corrente para o MPPT. Na segunda etapa é calculado e dimensionado os componentes do conversor CUK e simulado para comparar os resultados. E por fim é simulada a junção do painel fotovoltaico com o conversor CUK.

Inicialmente é necessário determinar alguns parâmetros de projetos, Tabela 4 que serão fundamentais para o funcionamento do conversor escolhido.

Tabela 4 - Valores definidos para o conversor CUK.

Lista de Parâmetros	Valores Definidos
Tensão de saída do conversor (V_o)	13,8 V
Tensão de entrada do conversor (V_i)	16,6 V
Frequência de operação (f)	120 kHz
Variação máxima de corrente nos indutores (Δi_L)	10 %
Tensão máxima de ondulação em C1 (ΔV_{c1})	5 %
Tensão máxima de ondulação na saída (ΔV_o)	1 %

Fonte - Elaborado pelo autor

Segundo a metodologia adotada no capítulo anterior, a tensão V_i de entrada do conversor CUK foi retirada do *datasheet* do painel fotovoltaico, quando este está operando em máxima potência.

4.1 Projeto do conversor CUK

Inicialmente, foi encontrado, por meio da equação 3.9, a taxa de trabalho D , considerando a tensão entrada do conversor CUK como sendo o painel fotovoltaico operando em máxima potência.

$$D = 0,454 \quad (4.1)$$

O indutor L1 de entrada do conversor CUK está em série com a fonte de alimentação, desta forma, possui a mesma corrente que a fonte e pode ser calculada como a relação entre potência de entrada e tensão de entrada. Dessa forma:

$$I_{L1} = I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{20W}{16,6V}$$

$$I_{L1} = 1.20A \quad (4.2)$$

Com a corrente encontrada na equação 4.2 pode-se calcular o indutor L1 mínimo para o projeto utilizando a equação 3.14 juntamente com a variação de corrente máxima pré-definida para o projeto. Nesse caso:

$$L1 \geq 518 \mu H \quad (4.3)$$

O indutor L2 na saída do conversor está em série com a carga, desta forma, possui a mesma corrente média que a saída e pode ser calculada como a relação entre potência e a tensão de saída estimada para o projeto. Considerando a potência de entrada igual a de saída em um sistema sem perdas, obtemos:

$$I_{L2} = I_{out} = \frac{P_{in}}{V_o} = \frac{20W}{13,8V}$$

$$I_{L2} = 1,45A \quad (4.4)$$

Com a corrente encontrada na equação 4.4 pode-se calcular o indutor L2 mínimo para o projeto utilizando a equação 3.15 em conjunto com a variação de corrente máxima pré-definida para o indutor L2. Nesse caso:

$$L2 \geq 429 \mu H \quad (4.5)$$

Pela equação 3.18 e sabendo a especificação na ondulação que a saída requer 1%, definida para este projeto, calcula-se o valor do capacitor C2:

$$C2 \geq 1,1 \mu F \quad (4.6)$$

Por meio da equação 3.16 encontra-se o valor da resistência da carga:

$$R = 9,52 \, \Omega \quad (4.7)$$

O próximo passo é calcular a tensão média em C1, que é a diferença de potencial entre a entrada e saída do circuito, equação 3.1. Após isso é necessário calcular a variação de tensão máxima determina para o projeto, que é de 5%, multiplicando a tensão média no capacitor C1 por 0,05. Com esse valor é possível calcular o valor mínimo para o Capacitor C1 por meio da equação 3.17. Assim encontra-se:

$$V_{C1} = 31 \, V \quad (4.8)$$

$$\Delta V_{C1} = 1,52 \, V \quad (4.9)$$

$$C1 \geq 3,6 \, \mu F \quad (4.10)$$

Os resultados dos cálculos de dimensionamento dos componentes do converso CUK, estão apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 - Valores calculados do conversor CUK.

Lista de Parâmetros	Valores Calculados
Ciclo de Trabalho (D)	0,454
Corrente média em L1 (I_{L1})	1,2A
Corrente média em L2 (I_{L2})	1,44A
Indutor L1(I_{L2})	523 μ H
Indutor L2(I_{L2})	433 μ H
Capacitor C1(I_{L2})	3,6 μ F
Capacitor C2(I_{L2})	1,1 μ F
Resistência de Carga (I_{L2})	9,52 Ω

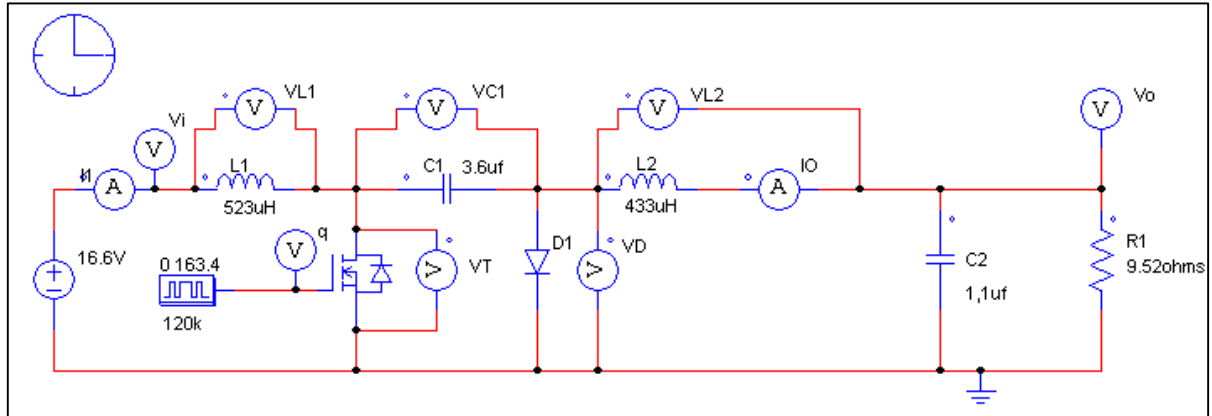
Fonte - Elaborado pelo autor

Após calcular os valores de todos os componentes do conversor CUK, foram elaboradas as simulações no software PSIM. Para as simulações foram utilizadas exatamente os valores calculados, para realizar a análise e a validação do projeto.

4.2 Simulação do conversor CUK

Com os valores calculados, pode-se montar a simulação descrita no capítulo anterior. A Figura 35 mostra a simulação dos componentes implementados no conversor.

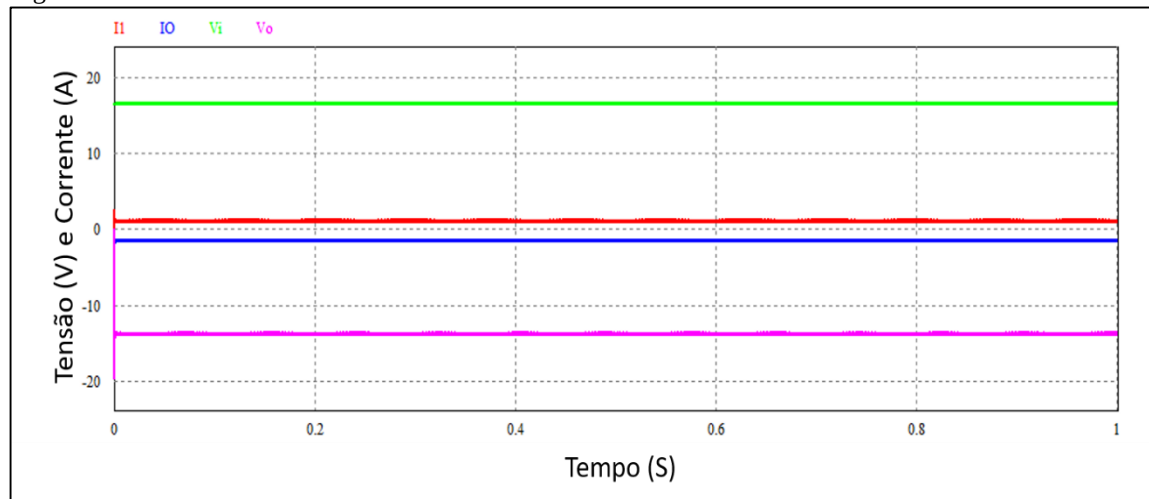
Figura 35 - Circuito simulado do conversor CUK.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Com o circuito montado foi possível obter as formas de ondas para análise das correntes e tensões do comportamento dos componentes eletrônicos, como mostra o gráfico da Figura 36.

Figura 36 - Circuito conversor CUK com chave aberta.



Fonte – Santos, 2015.

Os valores das correntes e tensões de entrada e saída do conversor ficaram aproximados aos calculados como mostra a Tabela 6.

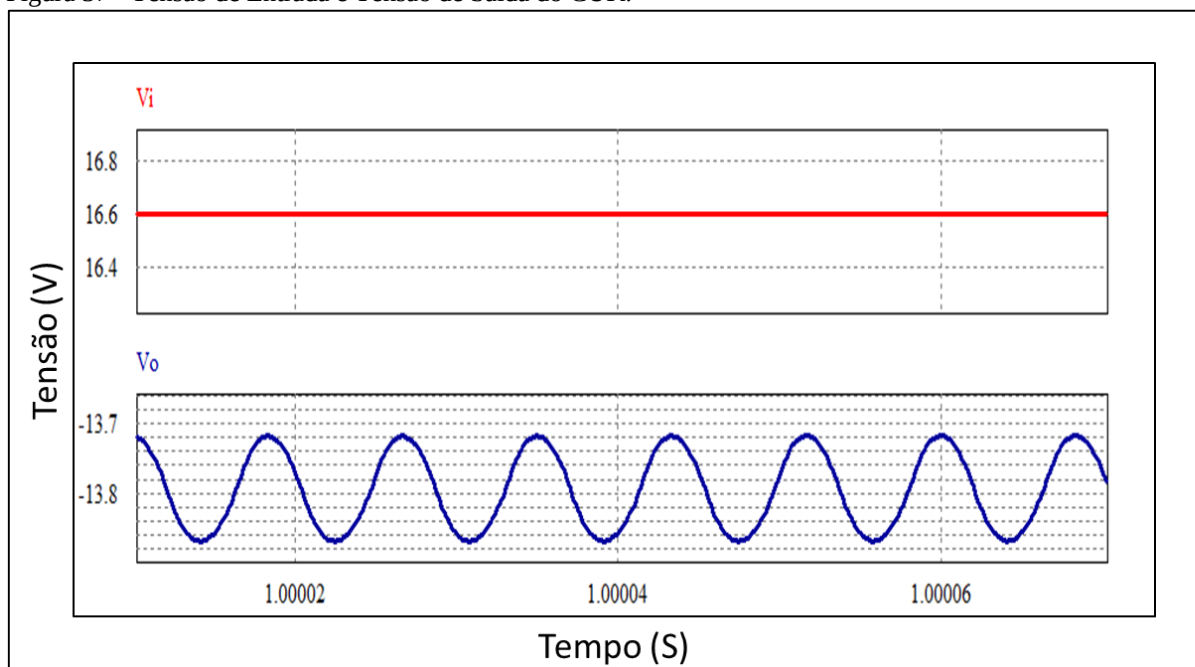
Tabela 6 – Conversor CUK comparação entre a da Simulação e os Cálculos.

Grandezas Observadas	Simulado	Calculado
Tensão de Entrada do CUK	16,6V	16,6V
Tensão de Saída do CUK	-13,74V	-13,8V
Corrente de Entrada do CUK	1.21A	1.20A
Corrente de Saída do CUK	1.43A	1.45A

Fonte - Elaborado pelo autor

Para realizar as simulações das variações de tensão de entrada e saída foi utilizado um tempo acima de 1 segundo, evitando assim pegar o transitório de energização do circuito, pois assim é possível analisar alguns ciclos de operação em regime permanente. Na Figura 37 é possível visualizar que variação da tensão de saída do conversor, quando aplicado na entrada uma tensão de 16,6V, é de aproximadamente 1,4V, que representa 1% de oscilação em relação a tensão de saída. Observa-se que os componentes desse circuito são dimensionados com os valores mínimos possíveis, para que nesse caso a variação fosse a máxima permitida, podendo ser comparada com os valores propostos.

Figura 37 - Tensão de Entrada e Tensão de Saída do CUK.

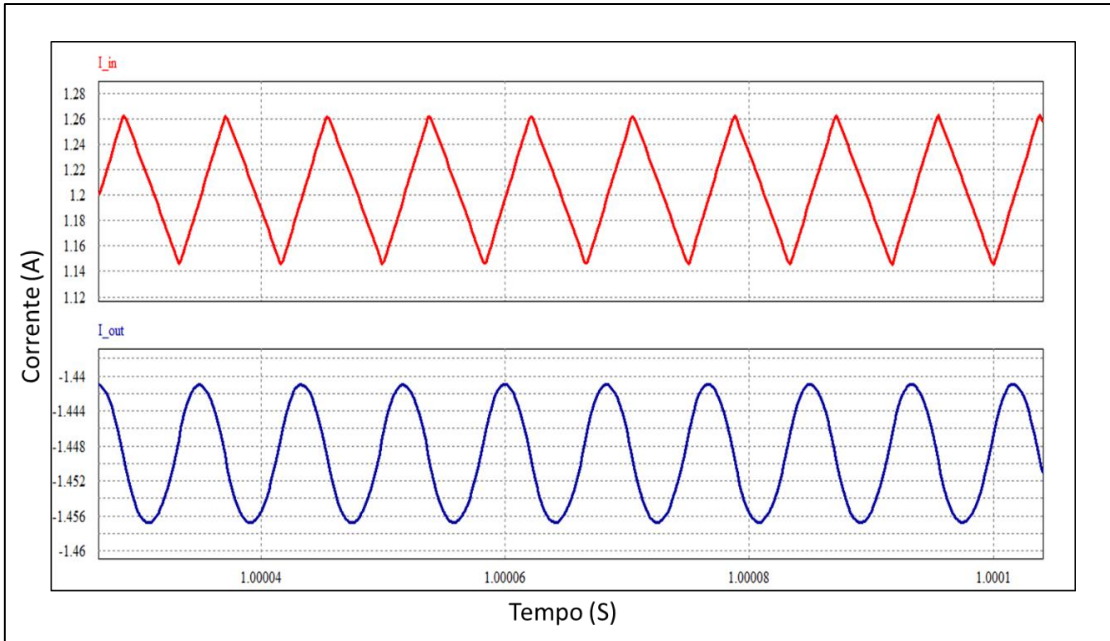


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores das correntes médias de entrada e saída do circuito são apresentados na Figura 38, onde é possível notar que a corrente média é similar as correntes calculadas. Ainda

é possível visualizar a variação da corrente de entrada, que é a mesma do indutor L1, é em torno de 1,2V que representa 10% da corrente máxima nesse indutor.

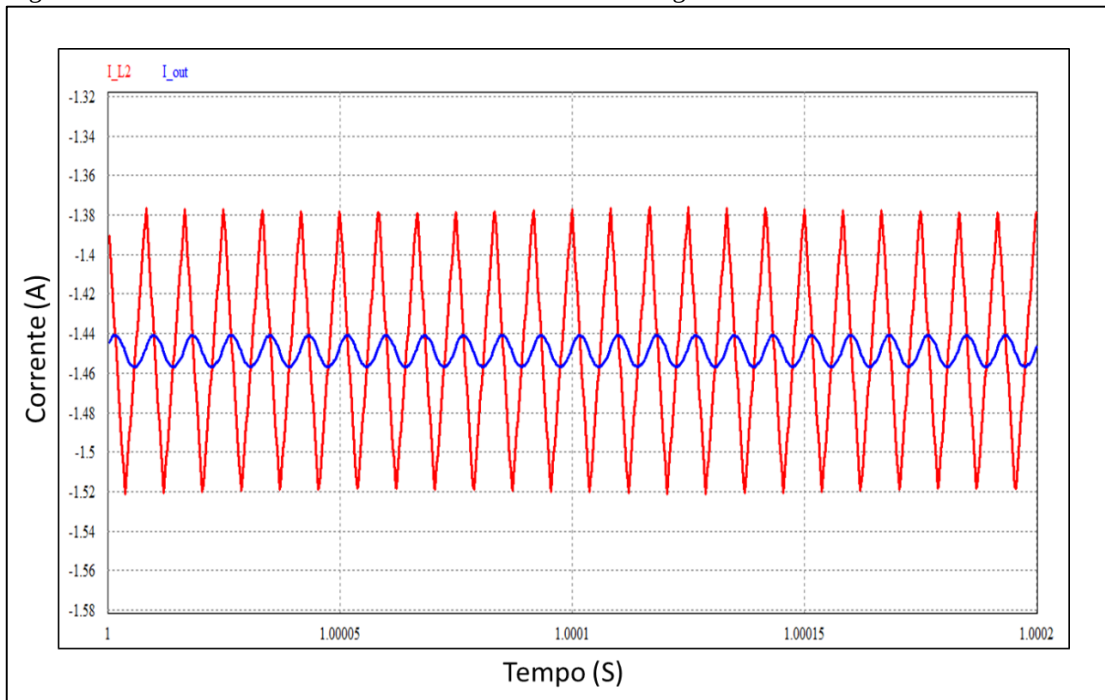
Figura 38 - Corrente de Entrada e Corrente de Saída do CUK.



Autor: Elaborado pelo autor.

A Figura 39 mostra que a corrente média no indutor L2 é igual a corrente de saída do conversor, porém a ondulação é menor por conta do capacitor C2 em paralelo com a carga, atuando como um filtro, minimizando o *ripple*.

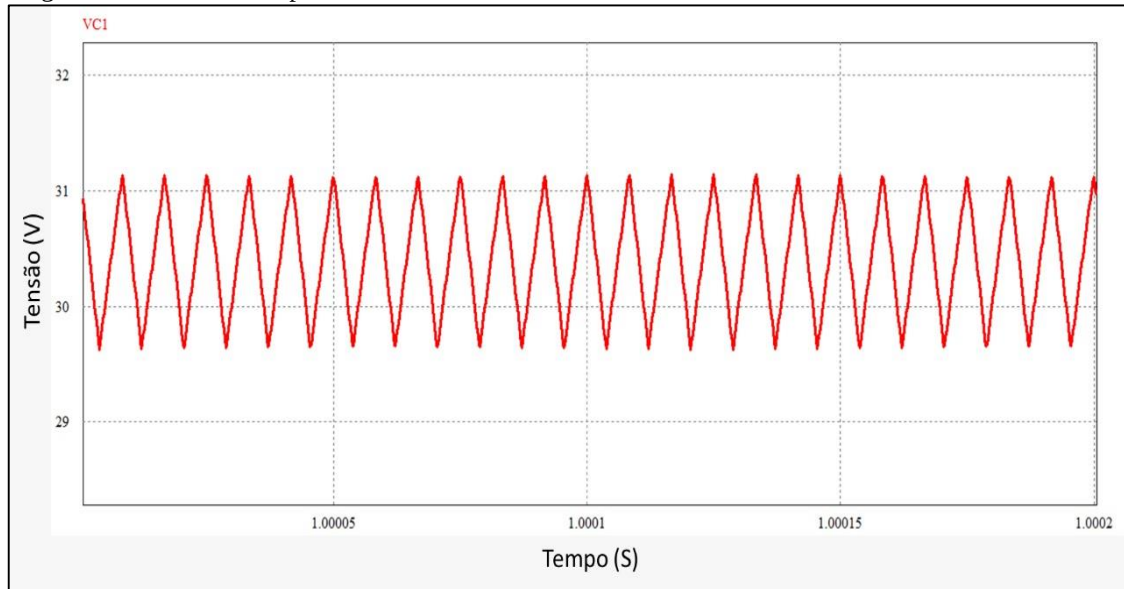
Figura 39 - Corrente no Indutor L2 e Corrente na Saída da Carga do CUK.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comportamento da tensão no capacitor C1 é apresentado na Figura 40 onde é identificado que a variação especificada em projeto é obtida em simulação, não ultrapassando o valor de 1,52V que representa 5% da tensão do próprio capacitor.

Figura 40 – Tensão no capacitor C1.

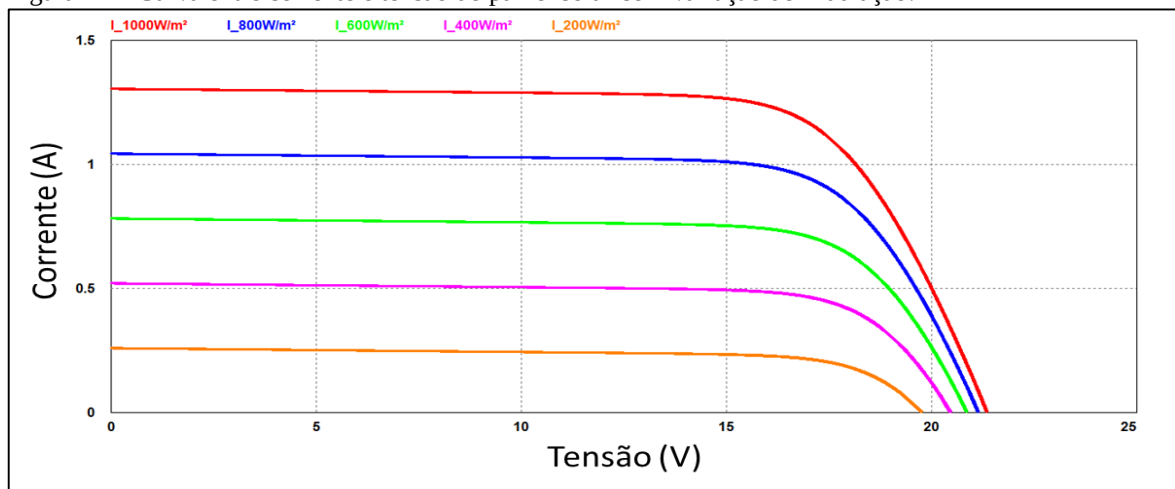


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Simulação do Painel Fotovoltaico

Após carregar todos os dados fornecidos pelo fabricante do módulo fotovoltaico, o painel solar foi testado em duas etapas. Na primeira, foi fixado a temperatura em 25°C, variado a radiação de 200 W/m² a 1000 W/m² e analisado as duas formas de onda características de um painel solar. Na Figura 41 é possível analisar o gráfico que relaciona a corrente com a tensão.

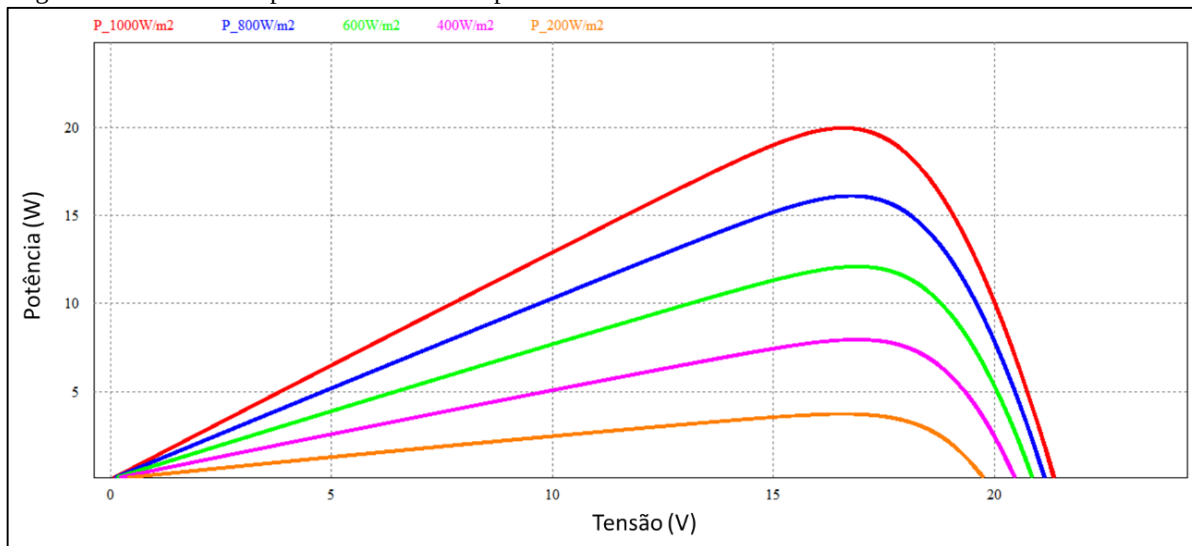
Figura 41 – Curva entre corrente e tensão do painel solar com variação de irradiação.



Fonte – Elaborado pelo autor.

A imagem mostra que ao variar a irradiação no painel, há uma pequena variação no nível de tensão, porém a corrente varia de forma proporcional a irradiação. Outra curva característica de análise do painel fotovoltaico é a que relaciona a tensão por potência. A Figura 42 apresenta essa curva, onde se pode notar que em qualquer que seja a irradiação aplicada ao painel, a tensão onde se encontra a máxima potência é em torno do 16,6 V de tensão

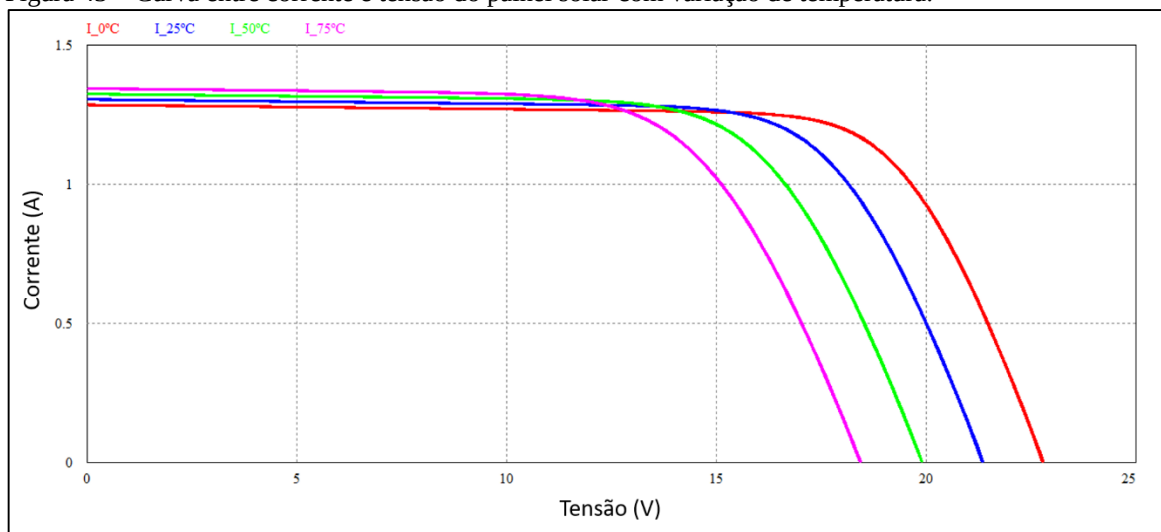
Figura 42 - Curva entre potência e tensão do painel solar.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Na segunda etapa manteve-se a irradiação do painel em 1000 W/m² e alternou-se a temperatura entre 0 e 75°C. A Figura 43 mostra que ao variar a temperatura no painel, há uma pequena variação no nível de corrente, porém a tensão varia de forma proporcional a temperatura.

Figura 43 – Curva entre corrente e tensão do painel solar com variação de temperatura.



Fonte – Elaborado pelo autor.

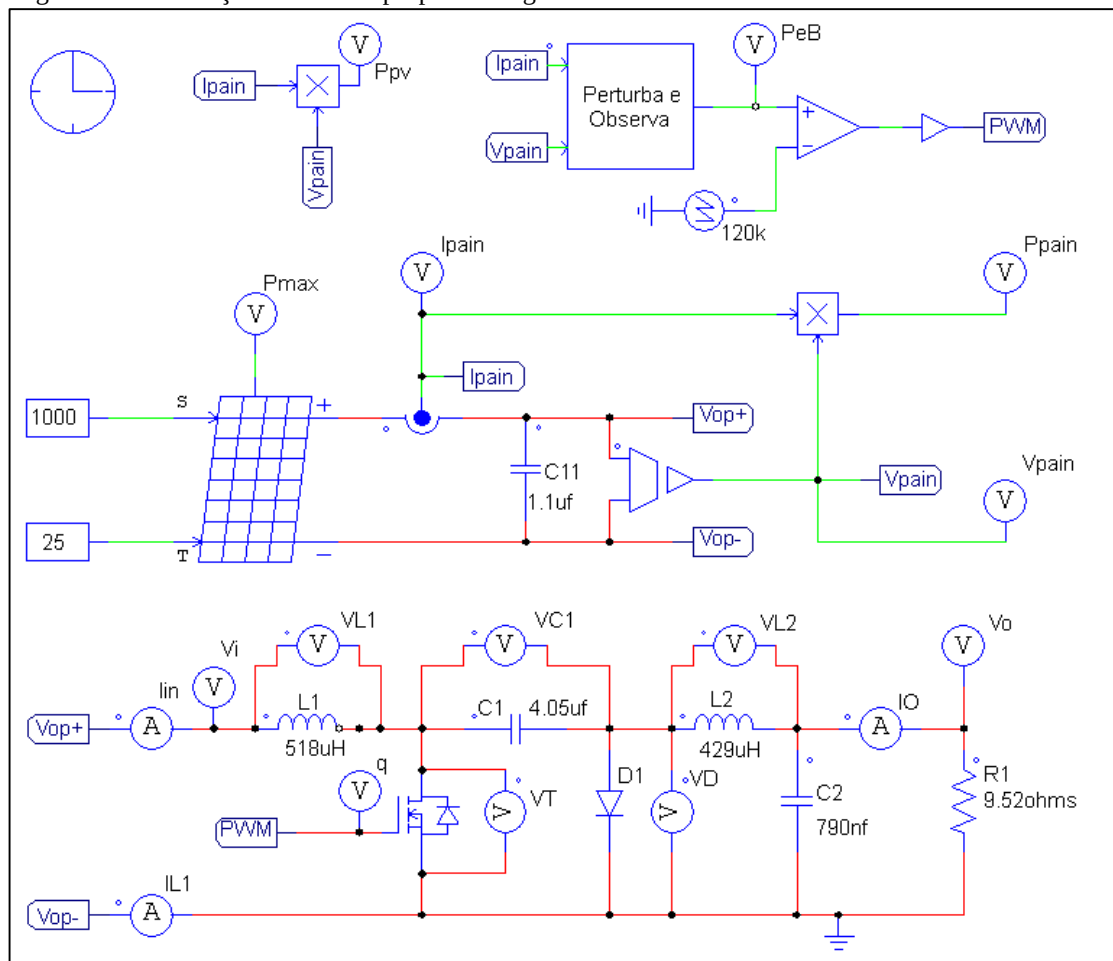
4.4 Simulação do MPPT com o Pannel Fotovoltaico e o CUK

Inicialmente, foi encontrado, por meio da equação 3.9, a taxa de trabalho D , considerando as tensões mínimas e máximas de entrada no conversor definidas para o projeto, observando as características do pannel fotovoltaico. Esses valores são utilizados na simulação do MPPT no modo P&O. O código do controle MPPT está no Apêndice A.

$$D_{12v} = 0,535 \quad D_{25v} = 0,355 \quad (4.11)$$

Com o conversor calculado e as simulações individuais realizadas, foram integrados os circuitos simulados do conversor e do pannel juntamente com o código MPPT como mostra a Figura 44.

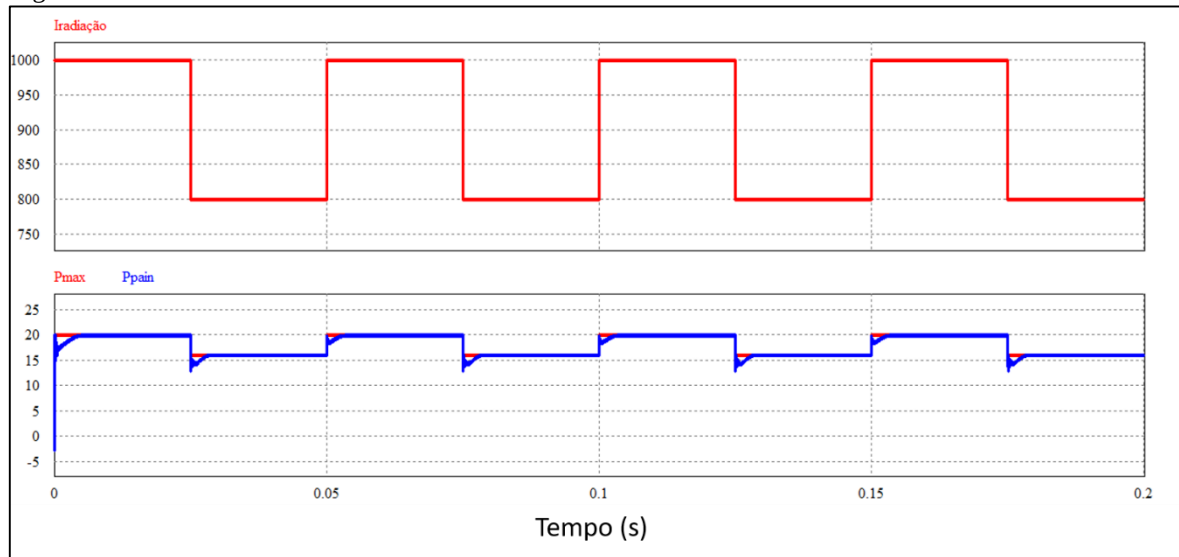
Figura 44 – Simulação do sistema proposto integrado.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

A Figura 45 apresenta as curvas da potência disponível no painel (P_{max}) e da potência efetivamente simulada na saída do módulo (P_{pain}), juntamente com as curvas de irradiação aplicadas na simulação. Nota-se que quando altera instantaneamente a irradiação, a potência de saída do painel busca instantaneamente rastrear o ponto de potência máxima.

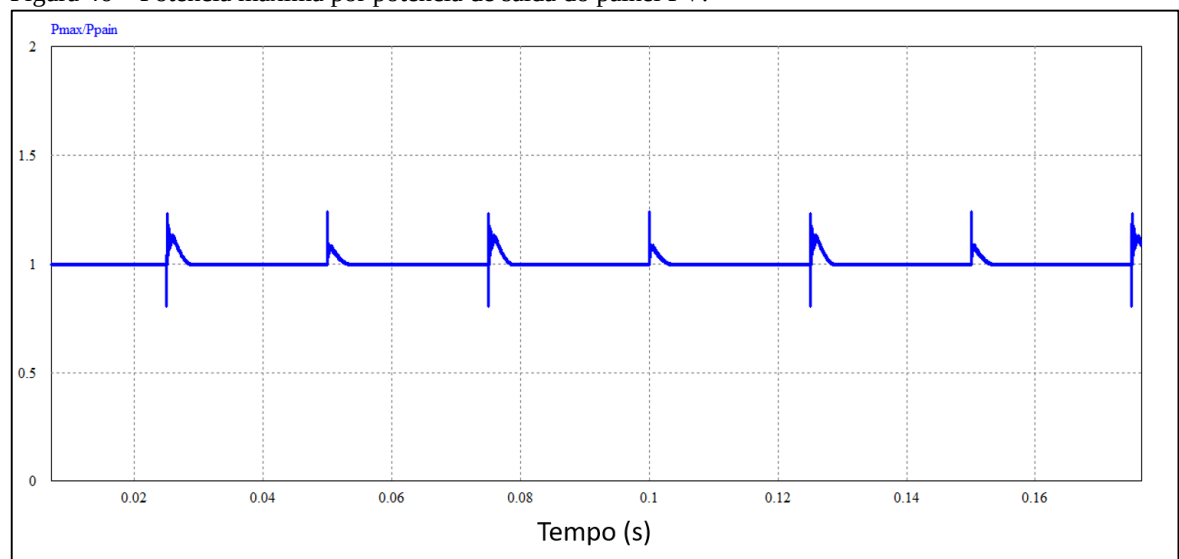
Figura 45 – Rastreabilidade do MPPT.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Na Figura 46 é relacionado a potência máxima possível do painel e a potência de saída, afim de comprovar a rastreabilidade do sistema simulado. A eficiência do sistema simulado foi de 99,34%.

Figura 46 – Potência máxima por potência de saída do painel PV.



Fonte – Elaborado pelo autor.

É possível perceber que tanto a Figura 46, quanto a Figura 45 apresentam comprovações que o circuito de controle do MPPT está realizando o rastreamento do ponto máximo, retirando assim a máxima potência do módulo solar.

4.5 Validação e implementação do circuito CUK com MPPT

Para a validação e implementação do circuito do conversor CC-CC CUK é necessário comparar os resultados obtidos nas simulações com as medições realizadas em bancada após a sua montagem. A coleta dos dados por meio do software Arduino IDE conectada ao ESP32 e com auxílio de instrumentos de medição de grandezas elétricas.

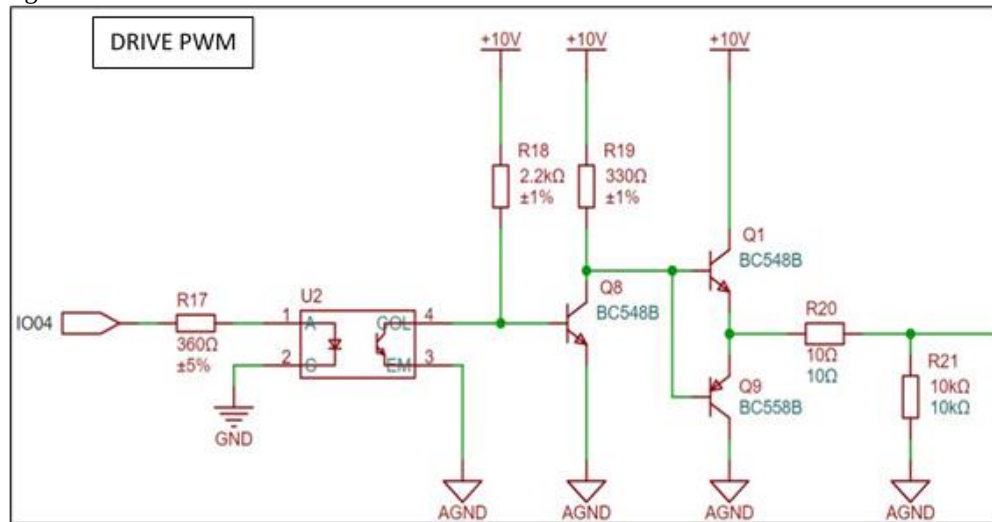
Em seguida, foi desenvolvido o protótipo de circuito impresso através da plataforma online *EasyEDA* e a fabricação industrial da placa de circuito impresso.

4.5.1 Validação do circuito CUK

Inicialmente foram realizados os testes no conversor CUK onde percebeu-se uma dificuldade de acionamento do transistor MOSFET, mesmo tendo utilizado o circuito integrado driver IR2104 e após o ULN2803 que são indicados para chaves em flutuação, o pulso do PWM que era amplificado pelo drive não era identificado pelo MOSFET, e ocorria um superaquecimento do MOSFET derrubando a sua alimentação por curto-circuito de dreno *suorce*.

Para a resolução do problema devido ao circuito CUK não utilizar um (GND) terra comum entre o negativo da bateria e o negativo do PV, utilizou-se a técnica de isolamento através de um CI foto acoplador modelo PC 817, que possui a sua entrada isolada da saída, a sua entrada possui um diodo emissor de luz aonde será conectado a saída PWM pino 26 do ESP32, e a saída possui um emissor de um transistor que irá alimentar um amplificador de pulso feito com três transistores que acionara o *gate* do transistor mosfet que necessita de 10V para seu perfeito acionamento, a Figura 47 representa o esquema utilizado no circuito CUK.

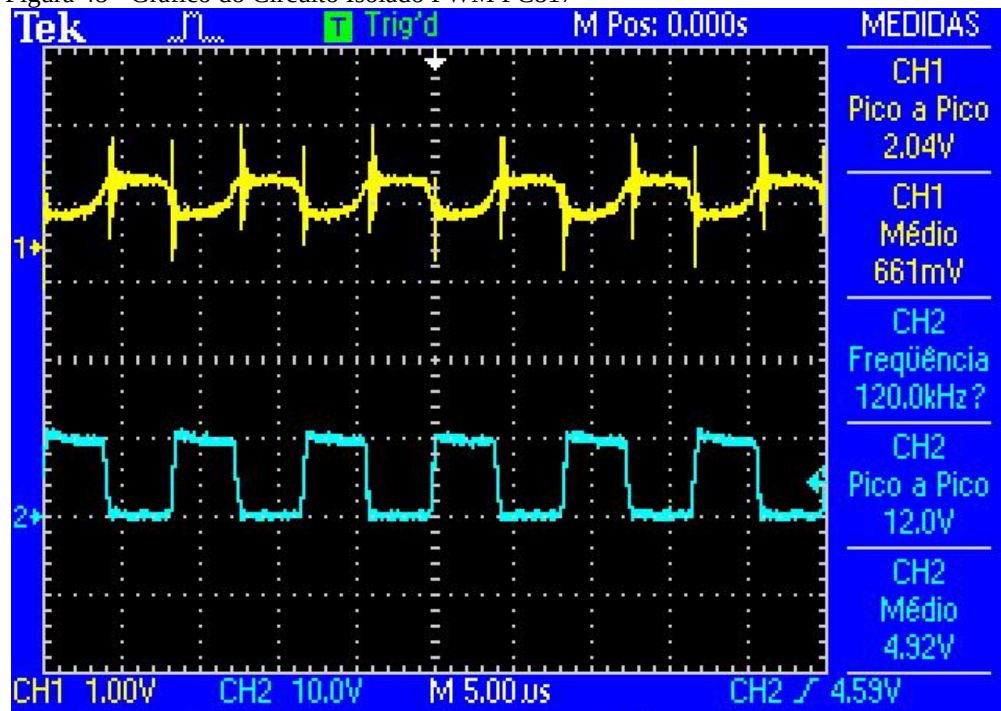
Figura 47 - Drive do PWM com CI isolador PC817



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 48 é possível verificar a frequência em 120 KHz utilizada no microcontrolador. No canal um temos o sinal do PWM após o fotoacoplador CI PC817, resultando em uma tensão de 2,04 V de pico, e o canal dois que está na saída do circuito drive que alimenta o *gate* do MOSFET, onde a tensão de pico é de 12 V, sendo a ideal para o acionamento desse tipo de MOSFET.

Figura 48 - Gráfico do Circuito Isolado PWM PC817

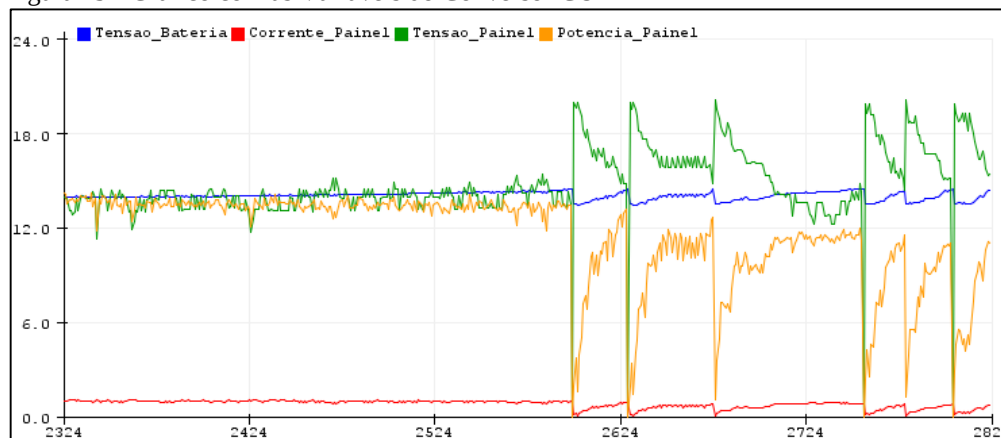


Fonte: Elaborado pelo autor

Com o recurso do programa Arduino IDE, na função disponível do *serial plotter* foi possível obter os dados gráficos dos sinais de tensão e corrente oriundos do painel fotovoltaico,

além da tensão da bateria e do PWM utilizados no protótipo. A Figura 49 mostra os valores de entrada e saída do conversor e pode-se observar que mesmo com a oscilação de tensão do PV, a tensão de saída se mantém estável durante o carregamento da bateria.

Figura 49 - Gráfico com as Variáveis do Conversor CUK



Fonte – Elaborado pelo autor.

Pode-se verificar que a tensão da bateria inicia em 12,9V e vai carregando por aproximadamente 30 minutos até atingir a tensão de 14,5V, onde a programação faz com que o carregamento seja desligado para a proteção da bateria, interrompendo o carregamento durante um determinado período e retornando logo em seguida.

4.5.2 Validação do circuito MPPT

Assim como a validação do conversor CUK, para a validação do circuito MPPT, foram comparados resultados obtidos nas medições realizadas em bancada com as simulações computacionais. A coleta dos dados por meio do software Arduino IDE conectada ao ESP32 e com auxílio de instrumentos de medição de grandezas elétricas.

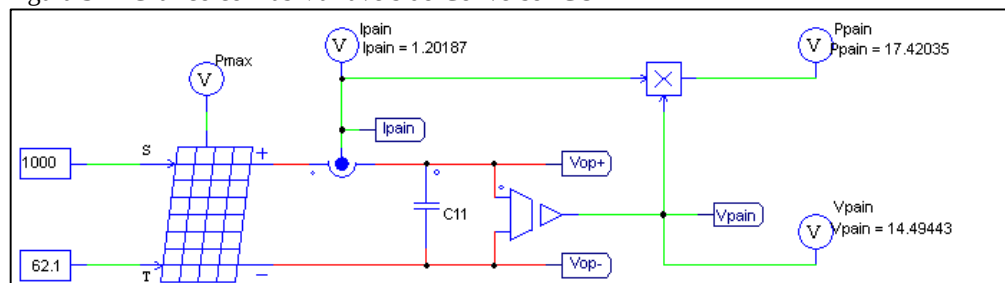
Primeiramente o painel fotovoltaico foi exposto a radiação solar em um dia com sol intenso, sem nuvens e em horário de pico de incidência do sol. A Figura 50 mostra a temperatura registrada no painel no momento dos testes (62,1°C). Com isso, o circuito de MPPT foi simulado no software PSIM com a temperatura registrada experimentalmente e irradiância solar estimada entre 950 W/m² e 1000 W/m², com base na média divulgada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), haja vista que não foram encontrados dados de irradiância no instante dos testes experimentais. A Figura 51 mostra o setup da simulação computacional com os respectivos valores de tensão e corrente registrados.

Figura 50 - Temperatura PV



Fonte: Elaborado pelo autor.

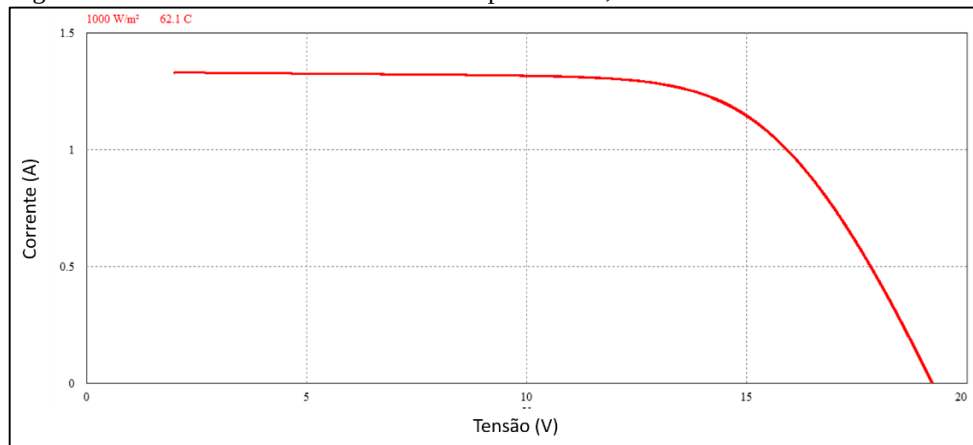
Figura 51 - Gráfico com as Variáveis do Conversor CUK



Fonte – Elaborado pelo autor.

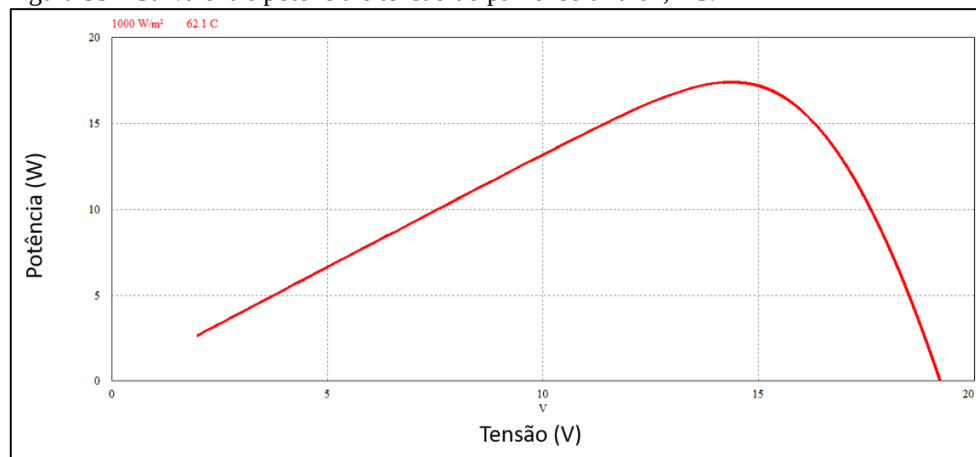
A Figura 52 mostra a curva de corrente versus tensão do circuito simulado no software PSIM com as condições citadas acima, enquanto a Figura 53 exibe a curva de potência versus tensão, evidenciando o ponto de máxima potência indicado pela simulação da Figura 51, o qual foi registrado com 14,49 V.

Figura 52 - Curva entre corrente e tensão do painel a 62,1°C.



Fonte – Elaborado pelo autor.

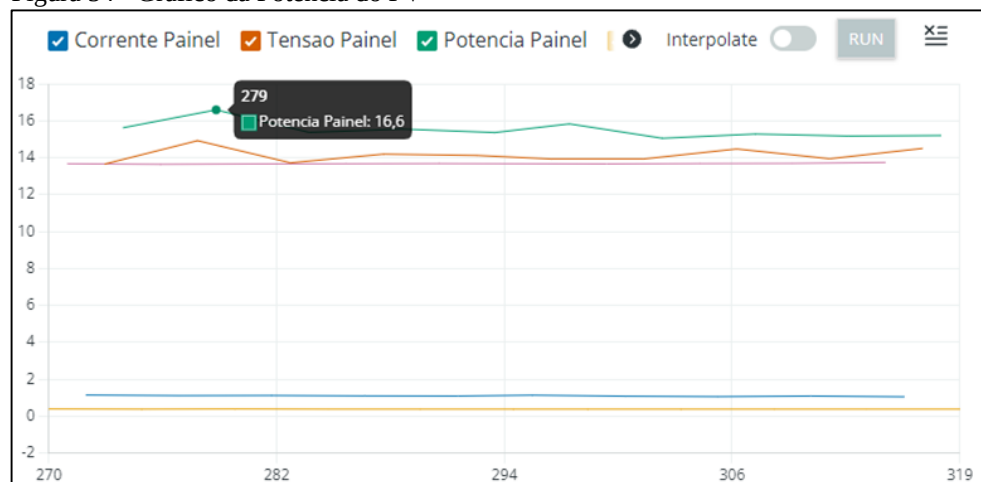
Figura 53 - Curva entre potência e tensão do painel solar a 62,1°C.



Fonte – Elaborado pelo autor.

A Figura 54 mostra os dados de corrente, tensão e potência retirados do painel fotovoltaico e registrados no Arduino IDE. Percebe-se que os dados se mantiveram estabilizados durante o ensaio.

Figura 54 - Gráfico da Potência do PV



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 7 mostra a comparação dos valores de tensão, corrente e potência medidos no ensaio do painel fotovoltaico com os valores de simulação com 950W/m^2 e 1000W/m^2 , considerando-se a temperatura medida no painel de $62,1^\circ\text{C}$. Em ambas as simulações os valores se mantiveram parecidos com os dados reais. Além disso, o pequeno erro registrado pode ser atribuído a incerteza quanto a irradiância solar incidida sobre o painel no momento do ensaio.

Tabela 7 - Comparação entre a da Simulação e Medição a $62,1^\circ\text{C}$.

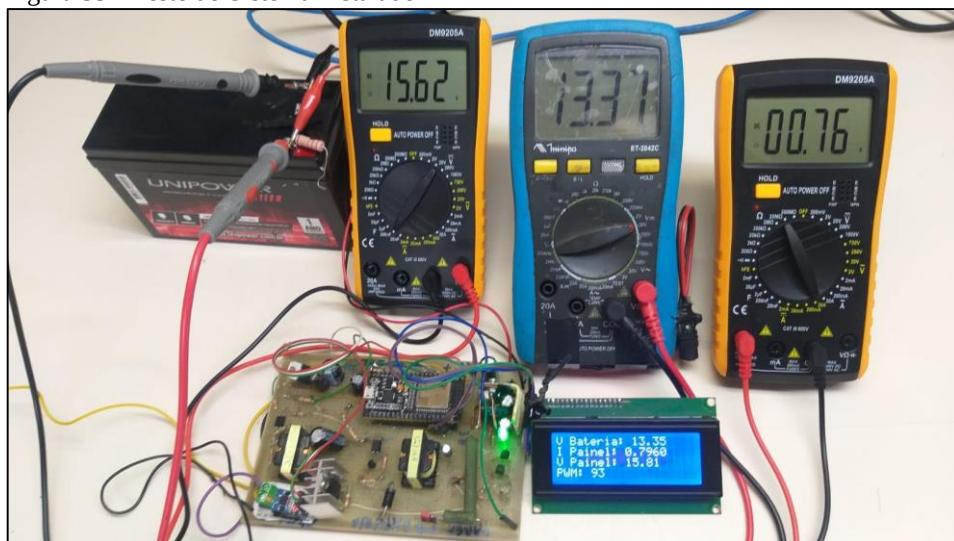
Grandezas	Simulação 950W/m^2	Simulação 1000W/m^2	Medição
Tensão do Painel	14,31V	14,49V	14,42V
Potência do Painel	16,6W	17,42W	16,62W
Corrente do Painel	1,14A	1,20A	1,15A

Fonte - Elaborado pelo autor

4.5.3 Implementação do circuito CUK de geração

Para a aplicação do método MPPT P&O e para o funcionamento do conversor CC-CC CUK foram realizados ensaios e coleta de dados a partir do PV instalado ao sol e com a bateria sendo carregada. A Figura 55 mostra o sistema do conversor CUK montado em placa experimental perfurada, onde foram realizadas as calibrações necessárias e testes com multímetros digitais para as devidas aferições das medidas realizadas. As aferições foram realizadas em dia com sol e sem nuvens, em que os valores de corrente e tensão registrados pelos multímetros digitais ficaram condizentes com os valores registrados pelo display LCD.

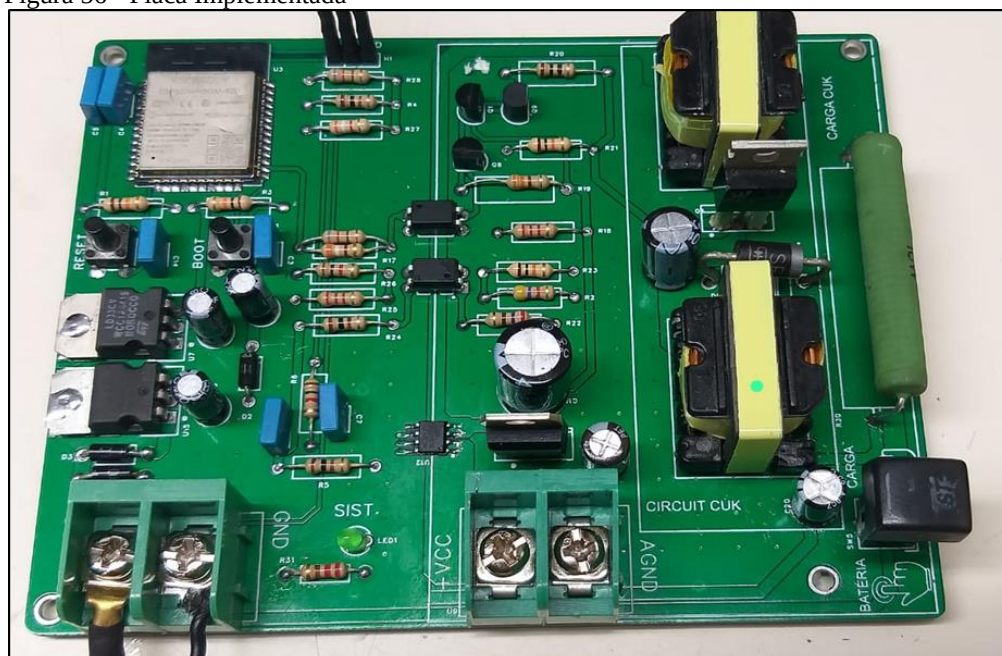
Figura 55 - Teste do Sistema Instalado



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o recurso do software de circuitos on-line EasyEDA, foi desenvolvida a Placa de Circuito Impressa (PCI) do protótipo, a qual foi construída pela empresa JLC, da China. A PCI com os componentes montados pode ser visualizada na Figura 56.

Figura 56 - Placa Implementada



Fonte: Elaborado pelo autor

O esquemático completo pode ser conferido no Apêndice C.

5 CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi projetar e implementar um sistema de um conversor CC-CC CUK alimentado por um painel de energia fotovoltaica isolado com controle de carga da bateria e implementação de MPPT.

Primeiramente foi efetuada a revisão bibliográfica da geração de energia fotovoltaica, seus princípios e suas funcionalidade e construção. Foi determinado o conversor ideal para um sistema de painel fotovoltaico, por ter características específicas que também possam gerenciar a carga da bateria para proteção de carga excessiva.

Na sequência foi definido e projetado o conversor CC-CC CUK, definida a bateria estacionária, definido os componentes essenciais do conversor, para assim certificar a sua funcionalidade e também a viabilidade econômica, permitindo assim a sua construção. Utilizando as simulações feitas no software PSIM, comprovou-se que os parâmetros estabelecidos para o projeto foram validados, ficando com valores aproximados.

Durante a implementação do sistema em bancada, surgiram dificuldades em alguns tópicos. No acionamento dos *mosfets* do conversor CUK, mesmo com a utilização de circuito de gate driver pronto, o conversor não funcionava. Isso ocorreu por não possuir referência de terra entre os circuitos, haja vista que o conversor estava utilizando um GND do PV que é diferente do GND da bateria e que está conectado ao microcontrolador, que por sua vez é o gerador de pulsos de PWM. A maneira utilizada para corrigir isso, foi isolar o circuito com fotoacoplador e fazer a amplificação com transistores para a tensão demandada pelo gate do MOSFET.

Dessa forma, o conversor CUK foi implementado em bancada confirmando a sua eficácia por meio do carregamento de uma bateria estacionária. Além disso, o circuito MPPT foi implementado com o intuito de se obter a máxima potência do módulo. Os resultados ficaram de acordo com o esperado e com valores muito próximos ao que foi simulado computacionalmente. Sendo assim, pode-se dizer que os resultados atenderam os objetivos principais, satisfazendo as especificações pré-definidas em projeto.

5.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se a implementação via software, de um sistema de controle de flutuação da bateria em modo contínuo após atingir o seu ponto máximo de carga. Sendo assim, garante-se uma vida útil maior da bateria e evitam-se os picos por desligamento repentinos do PWM.

Também pode-se ressaltar a necessidade de implementação de dissipadores de calor para sistema de resfriamento dos componentes de potência como o MOSFET e diodo do CUK, bem como o estudo de outras alternativas de topologias para o driver de acionamento do conversor.

REFERÊNCIAS

ADÃO, Manuel. **CURSO DE BATERIAS E PILHAS**. Luanda-Angola: TECNISAT, 2013. Disponível: < <https://slideplayer.com.br/slide/10903447/>>. Acesso em: 29 mai.2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª edição. Brasília, 2008, 159 p.

ARRABAÇA, Devair Aparecido; GIMENEZ, Salvador Pinillos. Conversores de energia elétrica CC/CC para aplicações em eletrônica de potência: conceitos, metodologia de análise e simulação. São Paulo: Editora Érica, 2013.

BRASIL, Cristiane Figueira. **Análise técnico-econômica e de eficiência dos principais tipos de baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos isolados**. 2018.

BLUESOL, **Célula Fotovoltaica Guia completo**. Disponível em: < <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>>. Acesso em: 16 mai.2022.

BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental. **Química Nova na escola**, v. 11, n. 3, 2000.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Alternativas Energéticas: uma visão Cemig**. Belo Horizonte: CEMIG, 2012.

CHAGAS, M. W. P. **Novas tecnologias para avaliação de baterias**. 97f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2007.

CHAMBOULEYRON, I. **Eletricidade Solar**. IN Ciência Hoje, São Paulo, SBPC, vol. 9, n. 54, jun. 1989, p. 32-39.

DOLARA, Alberto; FARANDA, R.; LEVA, Sonia. Energy comparison of seven MPPT techniques for PV systems. **Journal of Electromagnetic Analysis and Applications**, v. 2009, 2009.

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. **Uma Revisão Sobre Bateria Parte I**. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/uma-revisao-sobre-baterias-parte-i/>>. Acesso em 04 jun. 2022.

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. **Circuito de Comando**. Disponível em: < <https://eletronicadepotencia.com/circuito-de-comando/> >. Acesso em 15 nov. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE 2022. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> >. Acesso em: 15/05/2022.

ESPRESSIF, **Esp32Wroom32D & Esp32Wroom32U Datasheet**. Disponível em: < https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf >. Acesso em:17/10/2022.

ESRAM, Trishan; CHAPMAN, Patrick L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. **IEEE Transactions on energy conversion**, v. 22, n. 2, p. 439-449, 2007.

ETATESLA, **Sistema On grid e Off grid**. Disponível em: <<https://etatesla.com.br/2020/10/15/sistema-on-grid-e-off-grid/>> Acesso em: 17/06/2022

FADIGAS, E. A. F. A. Energia solar fotovoltaica: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. **Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo**, p. 32, 2012.

FVML, **Reguladores de Tensão Lineares o que**. Disponível em: < <https://www.fvml.com.br/2019/04/reguladores-de-tensao-lineares-o-que.html> >. Acesso em:30/10/2022.

LAFUENTE, César Orellana. **Carregador de baterias monofásico para aplicação em veículos elétricos**. 2011.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia Solar para Produção de Eletricidade**. 1.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

HART, Daniel W. **Eletrônica de potência**: análise e projetos de circuitos. Tradução: Romeu Abdo. Porto Alegre: AMGH Editora, 2012.

DE OLIVEIRA, Frederico José. **Estudo e Implementação de um Conversor CC-CC Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Orientador: Dsc. Alex-Sander Amável Luiz. 2016. 150f. Monografia (TCC) - Texto do Relatório Final do Trabalho e Conclusão de Curso II submetido ao professor da disciplina de TCC II do curso de Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

LUNA FILHO, Gustavo José. **Previsão da autonomia de baterias de chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de geração de energia utilizando o método KiBaM**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco, 2017.

MATTOS, F. C. **Contribuição ao Estudo de um Sistema Solar Fotovoltaico Monofásico de Único Estágio**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juíz de Fora - UFJF. Brasil, 2011.

MICHELINI, Aldo. Baterias recarregáveis: para equipamentos portáteis. **STA–Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA**, 2017.

DO NASCIMENTO, Cássio Araújo. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Orientador: Prof. Es. Carlos Alberto Alvarenga. 2004. 21f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação Lato-Sensu em Fontes alternativas de energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). SGI 2.5 – **Introdução ao Sistema de Informações Geográficas** – SGI. Imagem Geosistemas São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995. Informativo INPE – 05 de janeiro de 2017 Número 08. Disponível em: <<http://www.inpe.br/informativo/08/nota03>>. Acesso em: 14 mai.2022.

NEOSOLAR ENERGIA. **Baterias Estacionárias**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/baterias-estacionarias>>. Acesso em: 08 jun. 2022.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (Org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Ed. Rev. e Atualizada. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

PORCIUNCULA, Cleber Mateus Duarte. **Aplicação de modelos elétricos de bateria na predição do tempo de vida de dispositivos móveis**. 2012.

PORTAL SOLAR. **Célula fotovoltaica**: tudo o que você precisa saber. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>>. Acesso em 16 mai. 2022a.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de trabalho de energia solar–GTES. CEPEL–DTE–CRESESB, 2014.

PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação do Pannel solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-pannel-solar.html>>. Acesso em 16 mai. 2022b.

ROBOTISTAN, **Espressif Esp32D Wifi Bluetooth Module**. Disponível em: <<https://www.robotistan.com/espressif-esp32d-wifi-bluetooth-module>>. Acesso em:30/10/2022.

SANTOS, GUILHERME VIANNA. **Modelagem do conversor Cúk**. Disponível em: <<https://eletronicaemcasa.blogspot.com/2014/05/modelagem-do-conversor-cuk.html>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

SANTOS, Mario Roberto dos; BRITO, José Luiz Romero de. A Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: uma Pesquisa Bibliométrica. In: Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA), 23, 2021, São Paulo. Anais São Paulo, Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://engemausp.submissao.com.br/23/anais/arquivos/286.pdf?v=1670377465>>. Acesso em: 29 nov. 2022.

VIAN, Ângelo et al. **Armazenamento de Energia**: Fundamentos Tecnologia e Aplicações. Editora Blucher, 2021.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael; GUERRA, Juarez. Energia Solar Fotovoltaica - Introdução. Revista o setor elétrico, São Paulo, ano 7, ed. 81, p. 48 - 59, out. 2012.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica**: Conceitos e aplicações. 2.ed.

rev. e atual. São Paulo: Érica, 2015.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Fotovoltaica: conceito e aplicação sistema isolados e conectados à rede**. 2ª Edição Revisada e Atualizada, Editora Saraiva, 2017.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael; RUPPERT FILHO, Ernesto. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 24, n. 5, p. 1198-1208, 2009.

WEINERT, Caio Cesar. **Aplicação do conversor CC-CC topologia Cuk para o carregamento de baterias de sistemas fotovoltaicos**. Orientador: Prof. Dr. Márcio Mendes Casaro. 2017. 68f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa-PR, 2017.

UNICOBA, **Manual Técnico: Bateria Estacionária UNIPOWER**. Unicoba ind. de comp. eletr. e inf. ltda.: Extrema/MG. Disponível em: <https://fccid.io/ANATEL/02112-13-04220/Manual_Tecnico_UNIPOWER_UPMF_-140114/3CEBA7AF-A703-433D-A299-C04D5A51F243/PDF>. Acesso em: 18 jun. 2022.

UNIPOWER, **Bateria Selada VRLA: Entenda como ela funciona**. Disponível em: <<https://unipower.com.br/bateria-selada-vrla/>>. Acesso em: 22 mai. 2022.

APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO MPPT

```

static double Ipv, Vpv, Ppv;   static double Ppv_ant = 0;
static double duty = 0.41;     static double duty_ant = 0;
static double step = 0.002;    static double contador;
double clock;
Ipv = in[0];                   Vpv = in[1];
clock=0.0002*contador;

if (t > clock)
{
    contador++;
    Ppv=Ipv*Vpv;
    if (((Ppv - Ppv_ant) / (duty - duty_ant)) > 0)
    {
        duty_ant = duty;
        duty = duty + step;
    }
    else
    {
        duty_ant=duty;
        duty=duty-step;
    }
    Ppv_ant = Ppv;
    if(duty>0.535)
    {
        duty=0.535;
    }
    If (duty < 0.355)
    {
        duty=0.355;
    }
}
out[0]=duty;

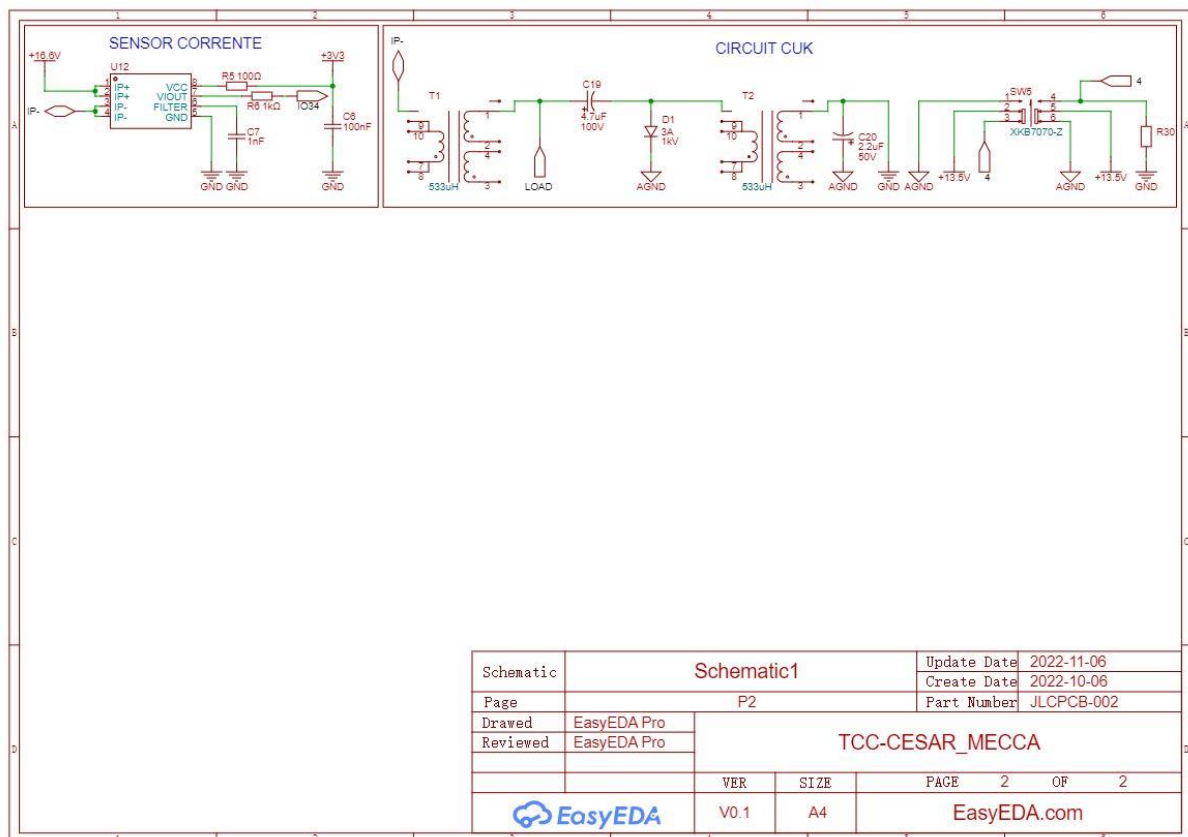
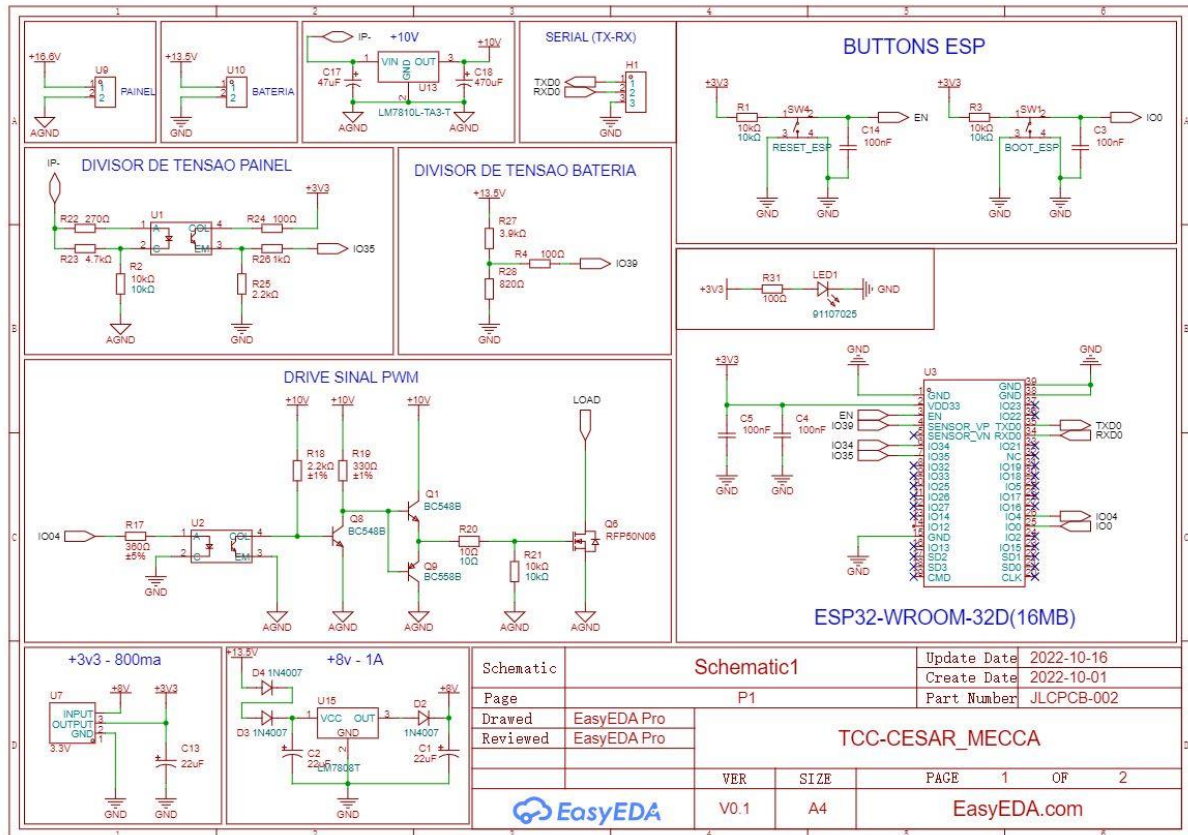
```

APÊNDICE B – LISTA DE MATERIAIS

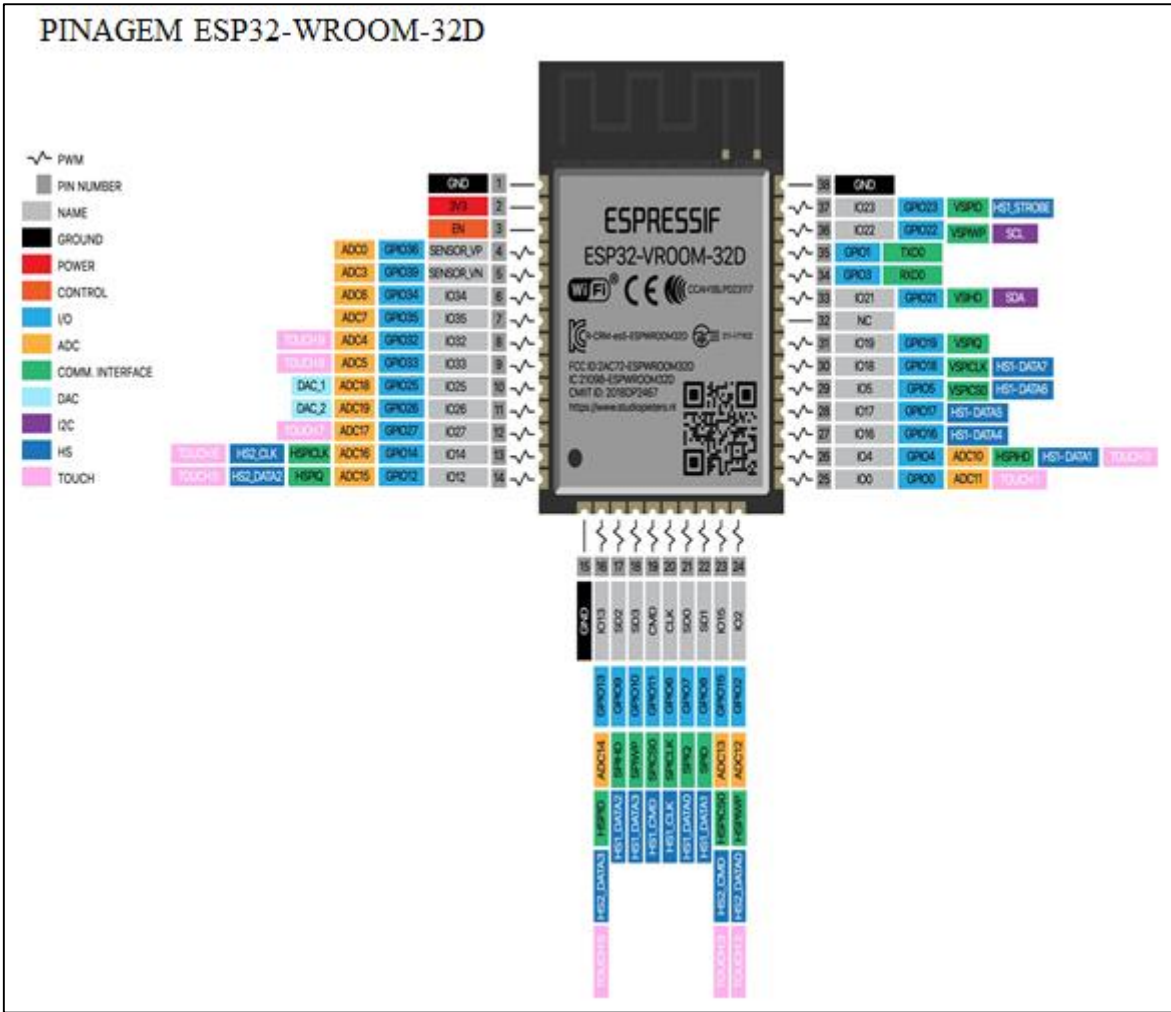
Quantidade	Valor	Componente
2	KF100	Bornes 2 Pinos
1	7x7x15 mm	Chave 2 Funções 6 terminais
2	PC817	Foto Acoplador Ótico
2	6x6x9,5 mm	Chave Tactil 4 terminais
10	100nF	Capacitor Poliéster
3	1nF	Capacitor Poliéster
3	2.2uF	Capacitor Eletrolítico
2	4.7uF	Capacitor Eletrolítico
5	22uF	Capacitor Eletrolítico
1	47uF	Capacitor Eletrolítico
1	470uF	Capacitor Eletrolítico
1	ACS712T	Circuito Integrado Corrente
3	1N4007	Diodo
1	MBR360	Diodo Schottky
1	ESP32-WROOM-32D	Microprocessador
1	429 μ H	Indutor L2
1	523 μ H	Indutor L1
1	2,1 V/20mA	Led Verde 3mm
1	15x15	Placa circuito impresso
1	LC33CV	Regulador de tensão 3,3 V
1	L7805	Regulador de tensão 5 V
1	L7810	Regulador de tensão 10 V
1	10 Ω	Resistor Carvão ¼ Watts
1	10 Ω	Resistor Fio 10 Watts
4	100 Ω	Resistor Carvão ¼ Watts
1	220 Ω	Resistor Carvão ¼ Watts
4	330 Ω	Resistor Carvão ¼ Watts

1	360Ω	Resistor Carvão ¼ Watts
1	820Ω	Resistor Carvão ¼ Watts
3	1kΩ	Resistor Carvão ¼ Watts
2	2.2kΩ	Resistor Carvão ¼ Watts
1	3.9kΩ	Resistor Carvão ¼ Watts
1	4.7kΩ	Resistor Carvão ¼ Watts
4	10kΩ	Resistor Carvão ¼ Watts
1	SFP50N06	Transistor MOSFET
2	BC548	Transistor NPN
1	BC558	Transistor PNP

APÊNDICE C - DIAGRAMA DO SISTEMA



ANEXO A - DIAGRAMA DE LIGAÇÃO DO PINOS DO ESP32



ANEXO B – DATASHEET DO PINOS DO ESP32

2 Pin Definitions

2 Pin Definitions

2.1 Pin Layout

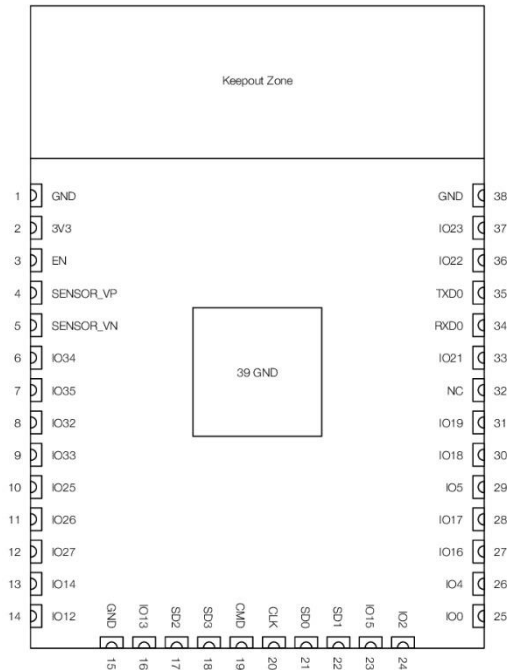


Figure 1: ESP32-WROOM-32D Pin Layout (Top View)

Note:

The pin layout of ESP32-WROOM-32U is the same as that of ESP32-WROOM-32D, except that ESP32-WROOM-32U has no keepout zone.

2.2 Pin Description

The ESP32-WROOM-32D and ESP32-WROOM-32U have 38 pins. See pin definitions in Table 3.

Table 3: Pin Definitions

Name	No.	Type	Function
GND	1	P	Ground
3V3	2	P	Power supply
EN	3	I	Module-enable signal. Active high.
SENSOR_VP	4	I	GPIO36, ADC1_CH0, RTC_GPIO0
SENSOR_VN	5	I	GPIO39, ADC1_CH3, RTC_GPIO3
IO34	6	I	GPIO34, ADC1_CH6, RTC_GPIO4
IO35	7	I	GPIO35, ADC1_CH7, RTC_GPIO5

2 Pin Definitions

Name	No.	Type	Function
IO32	8	I/O	GPIO32, XTAL_32K_P (32.768 kHz crystal oscillator input), ADC1_CH4, TOUCH9, RTC_GPIO9
IO33	9	I/O	GPIO33, XTAL_32K_N (32.768 kHz crystal oscillator output), ADC1_CH5, TOUCH8, RTC_GPIO8
IO25	10	I/O	GPIO25, DAC_1, ADC2_CH8, RTC_GPIO6, EMAC_RXD0
IO26	11	I/O	GPIO26, DAC_2, ADC2_CH9, RTC_GPIO7, EMAC_RXD1
IO27	12	I/O	GPIO27, ADC2_CH7, TOUCH7, RTC_GPIO17, EMAC_RX_DV
IO14	13	I/O	GPIO14, ADC2_CH6, TOUCH6, RTC_GPIO16, MTMS, HSPICLK, HS2_CLK, SD_CLK, EMAC_TXD2
IO12	14	I/O	GPIO12, ADC2_CH5, TOUCH5, RTC_GPIO15, MTDI, HSPICLK, HS2_DATA2, SD_DATA2, EMAC_TXD3
GND	15	P	Ground
IO13	16	I/O	GPIO13, ADC2_CH4, TOUCH4, RTC_GPIO14, MTCK, HSPID, HS2_DATA3, SD_DATA3, EMAC_RX_ER
SHD/SD2*	17	I/O	GPIO9, SD_DATA2, SPIHD, HS1_DATA2, U1RXD
SWP/SD3*	18	I/O	GPIO10, SD_DATA3, SPIWP, HS1_DATA3, U1TXD
SCS/CMD*	19	I/O	GPIO11, SD_CMD, SPICSS0, HS1_CMD, U1RTS
SCK/CLK*	20	I/O	GPIO6, SD_CLK, SPICLK, HS1_CLK, U1CTS
SDO/SD0*	21	I/O	GPIO7, SD_DATA0, SPIQ, HS1_DATA0, U2RTS
SDI/SD1*	22	I/O	GPIO8, SD_DATA1, SPID, HS1_DATA1, U2CTS
IO15	23	I/O	GPIO15, ADC2_CH3, TOUCH3, MTDO, HSPICSS0, RTC_GPIO13, HS2_CMD, SD_CMD, EMAC_RXD3
IO2	24	I/O	GPIO2, ADC2_CH2, TOUCH2, RTC_GPIO12, HSPICSS0, HS2_DATA0, SD_DATA0
IO0	25	I/O	GPIO0, ADC2_CH1, TOUCH1, RTC_GPIO11, CLK_OUT1, EMAC_TX_CLK
IO4	26	I/O	GPIO4, ADC2_CH0, TOUCH0, RTC_GPIO10, HSPICSS0, HS2_DATA1, SD_DATA1, EMAC_TX_ER
IO16	27	I/O	GPIO16, HS1_DATA4, U2RXD, EMAC_CLK_OUT
IO17	28	I/O	GPIO17, HS1_DATA5, U2TXD, EMAC_CLK_OUT_180
IO5	29	I/O	GPIO5, VSPICSS0, HS1_DATA6, EMAC_RX_CLK
IO18	30	I/O	GPIO18, VSPICLK, HS1_DATA7
IO19	31	I/O	GPIO19, VSPICQ, U0CTS, EMAC_TXD0
NC	32	-	-
IO21	33	I/O	GPIO21, VSPICHD, EMAC_TX_EN
RXD0	34	I/O	GPIO3, U0RXD, CLK_OUT2
TXD0	35	I/O	GPIO1, U0TXD, CLK_OUT3, EMAC_RXD2
IO22	36	I/O	GPIO22, VSPICSS0, U0RTS, EMAC_TXD1
IO23	37	I/O	GPIO23, VSPID, HS1_STROBE
GND	38	P	Ground

Notice:

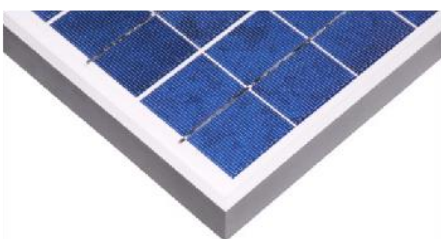
* Pins SCK/CLK, SDO/SD0, SDI/SD1, SHD/SD2, SWP/SD3 and SCS/CMD, namely, GPIO6 to GPIO11 are connected to the integrated SPI flash integrated on the module and are not recommended for other uses.

Not Recommended For New Designs (NRND)

ANEXO C – DATASHEET DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

JS 20 SERIES

YL020P-17b 1/7



ABOUT GAIN SOLAR

Founded in 2007, Baoding Jiasheng Photovoltaic Technology Co., Ltd which markets its products under the brand "Gain Solar", is a wholly owned subsidiary of Yingli Solar, specializing in R&D, manufacturing and marketing of photovoltaic (PV) off-grid products and systems. What started as the in-house off-grid PV module production of Yingli Solar has developed over the years into a full-blown provider of off-grid PV modules, building-integrated PV modules, off-grid PV systems and solar application products. Founded on the Yingli Solar technology development, production, and distribution platform, Gain Solar has rapidly grown to set up branches in major provinces and cities of China and is now expanding its presence to the global level. Gain solar is dedicated to provide high quality off-grid PV products and systems to customers and received a series of certificate, including ISO9001, TUV, UL, CE, CQC and RoHS.

PERFORMANCE

High efficiency, polycrystalline solar cells with high transmission and textured glass delivering a module efficiency of up to 15.0%, minimizing installation costs and maximizing the kWh output of your system per unit area.

QUALITY AND RELIABILITY

- Industry leading in-house manufacturing of polysilicon, ingots, wafers, cells and modules ensures tight control of our material and production quality.
- Robust, corrosion resistant aluminum frame independently tested to withstand wind loads of 2.4 kPa and snow loads of 2.4 kPa ensuring a stable mechanical life for your modules.
- Module packaging optimized to protect product during transportation and minimize on-site waste.
- This type of module is commonly use for the small off-grid system.

JS 20 SERIES

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)				
Module name				JS 20
Module type				YL20P-17b 1/7
Power output	P_{max}	W		20
Power output tolerances	ΔP_{max}	%		+/- 5
Module efficiency	η_m	%		11.50
Voltage at P_{max}	V_{mpp}	V		16.60
Current at P_{max}	I_{mpp}	A		1.20
Open-circuit voltage	V_{oc}	V		21.4
Short-circuit current	I_{sc}	A		1.31

STC: 1000W/m² irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3.
Average relative efficiency reduction of 5% at 200W/m² according to EN 60904-1.

THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal operating cell temperature	NOCT	°C	46 +/- 2
Temperature coefficient of P_{max}	γ	%/°C	-0.45
Temperature coefficient of V_{oc}	β_{voc}	%/°C	-0.37
Temperature coefficient of I_{sc}	α_{sc}	%/°C	0.06

OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	50V _{DC}
Max. series fuse rating	5A
Limiting reverse current	Don't apply external voltages larger than Voc of the module
Operating temperature range	-40 to 85°C
Max. static load, front (e.g., snow and wind)	2400Pa
Max. static load, back (e.g., wind)	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s

CONSTRUCTION MATERIALS

Front cover (material / thickness)	low-iron tempered glass / 3.2mm
Cell (quantity / material / dimensions)	36 / multicrystalline silicon / 70mm x 52mm
Encapsulant (material)	ethylene vinyl acetate (EVA)
Frame (material / color / anodization color)	anodized aluminum alloy / silver / clear

- Due to continuous innovation, research and product improvement, the specifications in this product information sheet are subject to change without prior notice. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed.
- The data do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison to different module types.

Baoding Jiasheng Photovoltaic Technology Co., Ltd
Add: No.333 North Lekai Avenue 071051, Baoding, China
Email: jsgd@yinglisolar.com
Web: www.gainsolar.cn
Service hotline: +86 312 863 1510/892 2683
Fax: +86 312 892 2202

GAINSOLAR.CN

© Baoding Jiasheng Photovoltaic Technology Co., Ltd | JS020P-17b_17_EU_EN_201403_v02

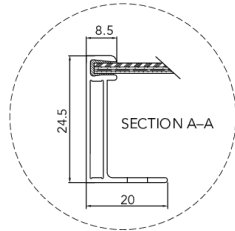
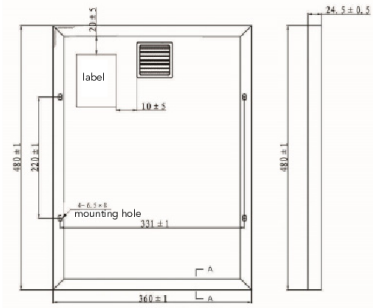
GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	360mm / 480mm / 25mm
Weight	2.26kg

PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per box	6
Packaging box dimensions (L / W / H)	390mm / 510mm / 190mm

Unit: mm



Warning: Read the Installation and User manual in its entirety before handling, installing, and operating Yingli Solar modules.

Our Partners:

