



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDERSON DOS SANTOS DIAS

**RASTREADOR DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA UM VEÍCULO AÉREO
NÃO TRIPULADO (VANT) DO TIPO QUADRIMOTOR ALIMENTADO SOMENTE
POR ENERGIA FOTOVOLTAICA**

FORTALEZA

2021

ANDERSON DOS SANTOS DIAS

RASTREADOR DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA UM VEÍCULO AÉREO
NÃO TRIPULADO (VANT) DO TIPO QUADRIMOTOR ALIMENTADO SOMENTE
POR ENERGIA FOTOVOLTAICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energia Solar Fotovoltaica

Orientador: Prof.^a Dra. Ana Fabíola Leite Almeida.

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D53r Dias, Anderson dos Santos.

Rastreador do ponto de máxima potência para um veículo aéreo não tripulado (vant) do tipo quadrimotor alimentado somente por energia fotovoltaica / Anderson dos Santos Dias. – 2021.

70 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Ana Fabíola Leite Almeida.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

1. Energia Solar. 2. Veículo aéreo não tripulado. 3. Rastreamento de ponto de máxima potência. I. Título.

CDD 620.1

ANDERSON DOS SANTOS DIAS

RASTREADOR DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA UM VEÍCULO
AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT) DO TIPO QUADRIMOTOR ALIMENTADO
SOMENTE POR ENERGIA FOTOVOLTAICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 31/03/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Ana Fabíola Leite Almeida (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais, Irene e Wellington.

A minha querida esposa, Karla Karine.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ser o meu pai, sempre cuidando de mim e me ajudado em todos os desafios.

A minha esposa Karla Karine por sempre acreditar em mim e apoiar em todas as decisões que tive que tomar. Nela sempre encontrei fortaleza e um porto seguro. Aos meus pais Irenilda dos Santos e José Wellington, por todos os ensinamentos e cuidado que tiveram comigo, pois nunca conseguirei compensar a dedicação que sempre demonstraram. As minhas irmãs Nauhan e Thaynan, por todos os momentos felizes e gratificantes em família.

A Prof.^a Dra. Ana Fabíola pela excelente orientação acadêmica, confiança, por acreditar em mim e pelos ensinamentos. Ao Prof. Dr. Francisco Nivaldo por me permitir a continuidade da pesquisa iniciada pelo Me. William Felipe, além de fornecer todo o suporte de materiais e equipamento para isso. Ao Me. William Felipe por ter desbravado e produzido todo o alicerce da minha pesquisa.

A Marília Mourão por ter me concedido muitos equipamentos para a construção de um laboratório de eletrônica na minha casa.

Ao Iure Gaier, da empresa Drone de Garagem, por ter me dado suporte e esclarecimento sempre que precisei.

Aos integrantes da banca, por disporem de seu tempo para estarem presentes.

Aos colegas de mestrado e a todos meus amigos que, de alguma forma, se fizeram presentes me incentivando e participando dos momentos de descontração e lazer.

“As invenções são, sobretudo, o resultado de um trabalho teimoso.”

Santos Dumont

RESUMO

Atualmente, o mundo tem enfrentado diversos desafios difíceis, destacando-se a poluição ambiental e a crise energética no topo dessa lista. Mediante a esse cenário, muitos esforços foram e continuam sendo tomados, por diversos países no intuito de empregar energia proveniente de fontes sustentáveis, sendo a energia solar uma das mais vantajosas entre elas. A energia solar é considerada a fonte mais confiável para o futuro, e a sua aplicação para voo é uma das utilizações mais promissoras de energias renováveis, que tem atraído inúmeros pesquisadores nos últimos anos. Por se tratar de uma fonte inesgotável, ela tem a capacidade de prolongar a autonomia das aeronaves. Outro fator que contribui é maximizar a utilização da energia solar nos momentos em que a mesma se encontra disponível. Para garantir que a potência máxima seja absorvida pelas células, um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) é geralmente incorporado ao sistema fotovoltaico. Com base nisso, o objetivo desse estudo é desenvolver um circuito MPPT que permita utilizar a energia solar fotovoltaica como fonte de energia limpa para abastecer um Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) do tipo quadrimotor, sem o uso de outras fontes de energia (baterias ou combustíveis). A partir dessa pesquisa também foi realizada a seleção do algoritmo MPPT que melhor se adequasse ao protótipo de VANT, possibilitando uma elevada eficiência e um baixo tempo de resposta. A realização dos testes demonstra que é possível alimentar um veículo aéreo não tripulado do tipo quadrimotor, por meio da energia solar. O estudo também mostrou que para que o protótipo decole do solo, a relação de empuxo dos motores e peso precisa ser maior que 1. Os dados simulados utilizando o software Proteus, permitiu a verificação dos algoritmos MPPT e seu ganho de potência.

Palavras-chave: Energia Solar. Veículo aéreo não tripulado. Rastreamento de ponto de máxima potência.

ABSTRACT

Today, the world has faced several difficult challenges, with environmental pollution and the energy crisis topping that list. Against this backdrop, many efforts have been and continue to be made by several countries in order to use energy from sustainable sources, with solar energy being one of the most advantageous of them. Solar energy is considered the most reliable source for the future, and its application for flight is one of the most promising uses of renewable energy, which has attracted countless researchers in recent years. Because it is an inexhaustible source, it has the ability to extend the autonomy of the aircraft. Another contributing factor is to maximize the use of solar energy when it is available. To ensure that the maximum power is absorbed by the cells, a type of maximum power point tracking algorithm (MPPT) is generally incorporated into the photovoltaic system. Based on this, the objective of this study is to develop an MPPT circuit that allows the use of photovoltaic solar energy as a clean energy source to supply a four-engine unmanned aerial vehicle (UAV), without the use of other energy sources (batteries or fuels). From this research, the selection of the MPPT algorithm that best suited the UAV prototype was also carried out, enabling high efficiency and a low response time. The performance of the tests demonstrates that it is possible to power an unmanned aerial vehicle of the four-engine type, by means of solar energy. The study also showed that for the prototype to take off from the ground, the thrust ratio of the engines and weight must be greater than 1. The data simulated using the Proteus software, allowed the verification of the MPPT algorithms and their power gain.

Keywords: Solar Energy. Unmanned Aerial Vehicle. Maximum power point tracking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller e a sua primeira célula solar, desenvolvida nos laboratórios da Bell Telephone C. em 1954.	21
Figura 2 - Sunrise I (1974) e Solaris (1976).....	22
Figura 3 - Princípio de funcionamento de uma célula solar.	23
Figura 4 - Curva I-V/ Curva de potência, destacando o MPP	26
Figura 5 - Variação da curva corrente / tensão de células solares com irradiância e temperatura (Silicon RWE-S-32).....	27
Figura 6 - Curvas I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas (a) em série e (b) em paralelo.	28
Figura 7 - Modelo ideal de célula fotovoltaica.....	29
Figura 8 - Modelo real de uma célula fotovoltaica	30
Figura 9 - Curva característica de uma célula prática	31
Figura 10 - Esquema da fonte de alimentação.....	33
Figura 11 - Funcionamento do conversor boost	35
Figura 12 - Classificação das técnicas MPPT	36
Figura 13 - Fluxograma do método de MPPT Condutância Incremental	38
Figura 14 - Fluxograma do método de MPPT Perturbe e Observe.....	40
Figura 15 - Comparação de dois motores.	44
Figura 16 - Características do Motor Brushless Emax Mt2213/935Kv.....	45
Figura 17 - (a). Emissor, (b). Receptor.	45
Figura 18 - Comandos do controle remoto.	46
Figura 19 - Movimentos básicos de um drone.....	46
Figura 20 - Controladora de voo CC3D	47
Figura 21 - Célula solar MAXEON™ GEN II da Sunpower.	47
Figura 22 - Arranjo fotovoltaico do protótipo.....	48
Figura 23 - Esboço do arranjo fotovoltaico	48
Figura 24 - Detalhe da estrutura suporte.	49
Figura 25 - Teste de comunicação entre o rádio e o drone.....	50
Figura 26 - Montagem dos periféricos	50
Figura 27 - Diagrama dos dispositivos elétricos do drone.....	51
Figura 28 – Configuração da controladora de voo	51
Figura 29 - Circuito modelo fotovoltaico no Proteus.....	52

Figura 30 - Circuito MPPT com Arduino	54
Figura 31 - Curva P-V do modelo no Proteus.....	57
Figura 32 - Curva I-V do modelo no Proteus	57
Figura 33 - Curva P-V do modelo no Proteus e valores medidos	58
Figura 34 - Curva I-V de modelo no Proteus e valores medidos.....	58
Figura 35 - Curvas de potência no painel para o algoritmo INC (a) e P&O (b).....	59
Figura 36 - Curvas de potência no painel com variação de radiação para o algoritmo INC (a) e P&O (b).....	60
Figura 37 - Curvas de potência no painel sem o MPPT	60
Figura 38 – Relação de ganho de potência na carga.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de diferentes técnicas de MPPT	41
Tabela 2 - Características dos motores Brushless	44
Tabela 3 - Especificação do modelo fotovoltaico no Proteus	53
Tabela 4 - Comparativo entre potências	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a-Si	Silício amorfo
CAD	Computer Aided Design
CC	Corrente Contínua
CdTe	Telureto de cádmio
CIS	Gálio e selênio de cobre indiano
DC	Direct current
DSC	Células solares sensibilizadas por corantes
DSP	Digital Signal Processor
IEC	International Electrotechnical Commission
IMU	Inertial Measurement Unit
MPP	Ponto de máxima potência
MPPT	Rastreamento do ponto de máxima potência
m-Si	Silício monocristalino
p-Si	Silício policristalino
PV	Fotovoltaico
STC	Standard test condition
TF-Si	Silicones de película fina
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitância
I	Corrente elétrica
I_{MP}	Corrente de máxima potência
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
L	Indutância
NP	número de células conectadas em paralelo
NS	número de células conectadas em série
P	Potência
R_P	resistência paralela equivalente do painel
R_S	Resistência série equivalente do painel
V	Tensão
V_{MP}	Tensão de máxima potência
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
V_T	Tensão térmica do painel

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo geral	19
2.2	Objetivos específicos	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
3.1	História do voo solar	20
3.2	VANT tipo quadrimotor	22
3.3	Célula Solar	22
3.3.1	<i>Tipos de células solares.....</i>	23
3.3.1.1	<i>Célula monocristalina de silício (m-Si)</i>	23
3.3.1.2	<i>Célula policristalina de silício (p-Si).....</i>	24
3.3.1.3	<i>Célula fotovoltaica de filme fino.....</i>	24
3.3.2	<i>Tensão e corrente de uma célula solar.....</i>	25
3.3.3	<i>Associação de células fotovoltaicos</i>	27
3.3.3.1	<i>Associação em série</i>	27
3.3.3.2	<i>Associação em paralelo</i>	28
3.3.4	<i>Modelagem fotovoltaica</i>	29
3.3.4.1	<i>Modelo ideal</i>	29
3.3.4.2	<i>Célula Fotovoltaica Prática.....</i>	30
3.4	Rastreador de Ponto de Máxima Potência (MPPT)	32
3.4.1	<i>Componentes do MPPT.....</i>	34
3.4.1.1	<i>Microcontroladores</i>	34
3.4.1.2	<i>Dispositivos de medição de tensão e corrente</i>	34
3.4.1.3	<i>Conversor CC-CC.....</i>	34
3.4.2	<i>Técnicas MPPT</i>	36

3.4.2.1	<i>Algoritmo de condutância Incremental</i>	37
3.4.2.2	<i>Algoritmo Perturbe e Observe</i>	39
3.4.3	<i>Análise e comparação das diferentes técnicas de MPPT</i>	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1	Sistema de propulsão	43
4.2	Sistema de controle	45
4.3	Componentes do protótipo	47
4.4	Montagem da controladora de voo	49
4.5	Aplicação do MPPT:	52
4.5.1	<i>Modelo do painel fotovoltaico usando o Proteus</i>	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1	Teste de voo	56
5.2	Simulação no Proteus	56
6	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	63
	ANEXO A – CÓDIGO DO ALGORITMO INC	68
	ANEXO B – CÓDIGO DO ALGORITMO P&O	70

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o mundo tem enfrentado diversos desafios, no qual pode-se destacar a poluição ambiental e a crise energética no topo dessa lista (ALVI, 2010). Mediante essas dificuldades, muitos esforços foram e continuam sendo tomados, por diversos países no intuito de empregar energia proveniente de fontes sustentáveis. Aos poucos, com o avanço da tecnologia e principalmente com a conscientização ambiental para a redução no consumo de fontes de energia não convencionais (petróleo, gás natural, carvão mineral, entre outras), a energia solar se tornou uma das mais promissoras formas de geração.

A geração de eletricidade através de células solares ou fotovoltaicas (PV), teve seu início no final da década de 1950, onde a sua aplicação era exclusiva para fornecer energia elétrica para satélites em órbita. A mesma, oferece várias vantagens significativas como: livre de poluição, operação silenciosa, vida útil longa, baixa manutenção, custo zero de energia de entrada (e custo operacional) e energia solar inesgotável como fonte de energia primária (BHATNAGAR; NEMA, 2013). Sistemas fotovoltaicos são altamente confiáveis e estão se tornando cada vez mais acessíveis com a redução do seu custo.

A utilização de energia solar para voo é uma área que tem atraído vários pesquisadores nos últimos anos, mediante ao fato de ser considerada a fonte mais confiável para o futuro (FAZELPOUR et al., 2013). Por se tratar de uma fonte inesgotável, ela tem a capacidade de prolongar a autonomia das aeronaves, contribuindo para um elevado tempo de voo (MA et al., 2010). Além do mais, com a utilização de um sistema de pilotagem automática na aeronave, se torna possível executar tarefas em qualquer lugar do planeta (RAPINETT, 2009). Veículos aéreos não tripulados (VANT) movidos a energia solar podem ser empregados em plataformas de comunicação em elevadas altitude, vigilância de fronteiras, combate a incêndios florestais, monitoramento de culturas, criação de linhas de energia e até mesmo a futura exploração de Marte e Vênus. Num cenário de medidas sanitárias, como no caso de uma pandemia, de covid-19, por exemplo, poderia ser aplicado para o monitoramento de aglomerações, além da medição de temperatura corpórea como vem sendo adotado por algumas cidades.

Segundo Abbe e Smith (2016), a utilização de aeronaves movidas a energia solar está gradualmente ganhando vantagem sobre as aeronaves movidas a

combustível em termos de compatibilidade tecnológica, ambiental e operacional. Materiais de alta resistência para minimizar o peso da estrutura externa, painéis solares de filme finos, células de combustível, baterias para fornecimento de energia regenerativa e unidades de propulsão leve são tecnologias-chave prontas para prolongar e quem sabe tornar contínuo o tempo de voo. Outro fator que contribui é maximizar a utilização da energia solar nos momentos em que a mesma se encontra disponível. Para tanto um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) é geralmente incorporado ao sistema fotovoltaico.

Sistemas fotovoltaicos possuem característica I-V não lineares e sua potência de saída depende das condições atmosféricas. Existe apenas uma região, o ponto de máxima potência (MPP) na curva P-V, justamente no joelho, onde a potência é máxima. Segundo Bialasiewicz (2008), MPPT consiste em uma técnica empregada para extrair a máxima potência disponível pelo gerador fotovoltaico, pois a posição do MPP varia continuamente com as mudanças nas condições atmosféricas. O MPPT rastreia a tensão de operação do painel correspondente ao MPP e mantém a operação neste ponto, extraindo assim a potência máxima.

A motivação do presente estudo veio a partir da pesquisa realizada anteriormente por Velandia (2018) no Laboratório em Filmes Finos em Energias Renováveis – Universidade Federal do Ceará (LAFER – UFC). Nela foi projetado a estrutura do drone com seu painel e sistema de propulsão, ficando o controle autônomo como sugestão de trabalho futuro.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um circuito MPPT que permita utilizar a energia solar fotovoltaica como fonte de energia limpa para abastecer um drone do tipo quadrimotor sem o uso de outras fontes de energia (baterias ou combustíveis).

2.2 Objetivos específicos

- Incorporar o controlador de voo ao protótipo de drone solar;
- Realizar reparos e substituições de células avariadas;
- Selecionar o algoritmo MPPT que melhor se aplique ao protótipo;
- Projetar o circuito MPPT para a alimentação dos motores;
- Levar ao campo o protótipo a fim de realizar os testes de alimentação de energia por meio do arranjo fotovoltaico.;
- Realizar medidas elétricas no momento que as células solares recebem radiação direta, afim de identificar melhor eficiência na geração com o circuito MPPT.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 História do voo solar

A aplicação de energia elétrica para a propulsão de veículos aéreos não é uma coisa nova. O pioneiro foi um dirigível francês em 1884, que venceu uma corrida de 10 km em volta de Villacoublay e Medon. Nesse período, o sistema elétrico era superior ao seu único rival, o moto a vapor. Porém com o surgimento dos motores a gasolina, o desenvolvimento de propulsores elétricos para veículos aéreos foi abandonado e o campo permaneceu sem atividades por quase um século (BOUCHER, 1984).

Em 30 de junho de 1957, o coronel britânico H. J. Taplin, realizou o primeiro voo controlado por rádio, com seu modelo "Radio Queen", que utilizava um motor de ímã permanente e uma bateria de prata e zinco. Outros desenvolvimentos no campo vieram do alemão Fred Militky, que conseguiu um voo bem-sucedido com um modelo não controlado em outubro de 1957. A partir de então, o voo elétrico evoluiu continuamente com melhorias constantes nos campos de motores e baterias.

Três anos antes das experiências de Taplin e Militky, em 1954, a tecnologia fotovoltaica nasceu nos Laboratórios Bell Telephone, nos Estados Unidos. Daryl Chaplin, Calvin Fuller e Gerald Pearson (Figura 1) desenvolveram a primeira célula fotovoltaica de silício capaz de converter energia solar em energia para alimentar equipamentos elétricos doméstica (CLEVELAND, 2013). As células solares fotovoltaicas foram construídas com uma eficiência inicial de 4% (sendo que a eficiência para células comerciais hoje em dia passa de 20%).

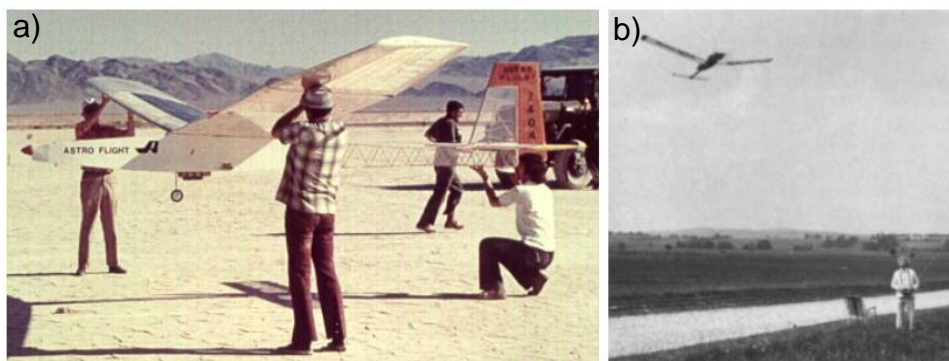
Figura 1 - Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller e a sua primeira célula solar, desenvolvida nos laboratórios da Bell Telephone C. em 1954.



Fonte: (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011)

Em 4 de novembro de 1974, ocorreu o primeiro voo de uma aeronave movida a energia solar, com o nome SUNRISE I (Figura 2(a)), no lago seco em Camp Irwin, Califórnia. Construída e pilotada por Robert J. Boucher da companhia Astro Flight Inc (BOUCHER, 1984), ela possuía 4096 células solares, de eficiência de 11%, tinha envergadura de 9,76 m, pesava 12,25 kg e potência de 450 W. A aeronave conseguiu atingir a marca de três a quatro horas de voo durante o inverno, mas foi seriamente danificado ao ser atingida por uma tempestade de areia. Assim, uma versão melhorada, Sunrise II, foi construída e testada em 12 de setembro de 1975. Possuindo a mesma envergadura, seu peso foi reduzido para 10,21 kg e as 4480 células solares conseguiram desta vez fornecer 600W graças à sua eficiência de 14%. Após muitas semanas de teste, esta segunda versão também foi danificada devido a uma falha no sistema de comando e controle. Do mesmo modo foi desenvolvido o SOLARIS, mostrado na Figura 2(b), por Fred Milikty no ano de 1976. Esta aeronave realizou um voo de pouco mais de 2 min a uma altura de 50 m (NOTH et al., 2008).

Figura 2 - Sunrise I (1974) e Solaris (1976)



Fonte: (NOTH et al., 2008)

3.2 VANT tipo quadrimotor

O VANT tipo quadrimotor trata-se de um veículo de decolagem e aterrissagem vertical (do inglês *Vertical Take-Off and Landing* - VTOL) de quatro rotores, que possuem como principais vantagens: uma capacidade de carga útil aumentada, uma estabilidade em foco inerente ao seu projeto e uma maior capacidade de manobra. Além disso, sua vantagem mais importante quando comparada a aeronaves convencionais, é o fato de possuir uma menor complexidade mecânica (ZHENG; XIONG; LUO, 2014).

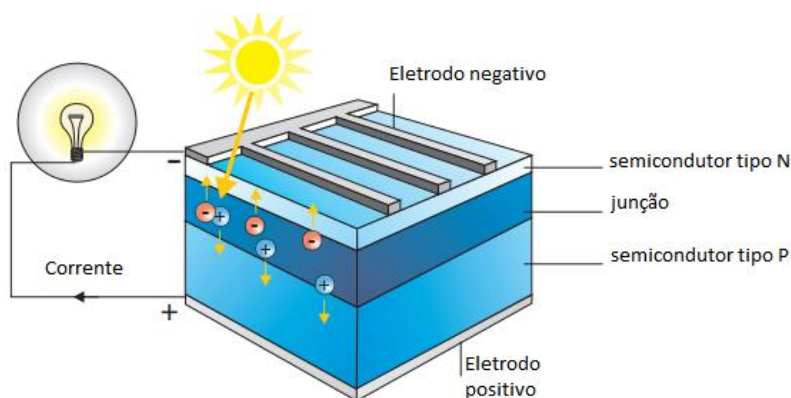
3.3 Célula Solar

Uma célula solar ou célula fotovoltaica se constitui de um dispositivo capaz de converter energia solar em eletricidade pelo efeito fotovoltaico. É bastante utilizado em aplicações espaciais, por ser uma fonte de energia limpa e de longa duração que requer quase nenhuma manutenção. As células solares são compostas de vários materiais semicondutores, constituindo uma ou mais camadas. O silício é o principal material empregado na sua fabricação, pois é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre e, portanto, barato.

Na Figura 3, uma célula solar de silício simples é representada por duas camadas de semicondutores dopados, tipo p e tipo n. Quando a luz solar atinge a superfície da célula solar, a célula cria portadores de carga como elétrons e lacunas. O campo interno formado pela junção separa algumas das cargas positivas (lacunas) das cargas negativas (elétrons). As lacunas são varridas para o positivo e os elétrons

são varridos para o negativo. Quando um circuito é criado, os elétrons livres precisam passar pela carga para se recombinar com as lacunas positivas, onde a corrente pode ser produzida a partir das células sob iluminação (SCHEIDT, 2007).

Figura 3 - Princípio de funcionamento de uma célula solar.



Fonte: (NOTH et al., 2008)

3.3.1 Tipos de células solares

Existem vários tipos de células fotovoltaicas que podem ser classificadas de acordo com o tipo de material, o processo de fabricação e o substrato. No entanto, são poucos os que podem ser aplicados em aeronaves movidas a energia solar devido à consideração da eficiência de conversão de energia, peso do substrato, custo-efetividade, adaptabilidade ambiental e confiabilidade. O silício é o tipo de célula fotovoltaica mais amplamente usado em aeronaves, mediante a essas considerações (GAO et al., 2015). O problema para a aplicação da célula fotovoltaica de silício em aeronaves movidas a energia solar é como encapsular a célula solar, pelo motivo de que os materiais cristalinos são muito frágeis e necessitam de uma boa estrutura de sustentação para evitar choques mecânicos.

3.3.1.1 Célula monocristalina de silício (*m-Si*)

As primeiras células solares disponíveis comercialmente foram feitas de silício monocristalino, que é uma forma extremamente pura de silício. Para produzi-los, um cristal de semente é retirado de uma massa de silício fundido, criando um lingote cilíndrico com uma estrutura de treliça de cristal única e contínua. Este cristal é então serrado mecanicamente em discos finos, polido e dopado para criar a junção

pn necessária. Depois que um revestimento anti-reflexo e os contatos metálicos dianteiro e traseiro são adicionados, a célula está pronta. As células de silício monocristalino são altamente eficientes, mas seu processo de fabricação é lento e trabalhoso, tornando-os mais caros do que seus equivalentes policristalinos ou de filmes finos. Em compensação, seu rendimento é significativo, de aproximadamente 16%, podendo chegar até 23% (BOULAID et al., 2017).

3.3.1.2 *Célula policristalina de silício (p-Si)*

Em vez de uma única estrutura cristalina uniforme, as células policristalinas contêm muitos pequenos grãos de cristais. Eles podem ser feitos simplesmente moldando um lingote em forma de cubo de silicone fundido e depois serrados e embalados de maneira semelhante às células monocristalinas (KIM et al., 2020). Uma alternativa mais barata, mas menos eficiente, as células fotovoltaicas de silício policristalino dominam o mercado mundial, representando cerca de 70% da produção global de fotovoltaicos em 2015. Sua produção é mais barata, mas seu rendimento é inferior, ficando entre 11% e 13% na média, podendo obter até 18% no laboratório.

3.3.1.3 *Célula fotovoltaica de filme fino*

Embora as células fotovoltaicas cristalinas dominem o mercado, as células também podem ser feitas a partir de filmes finos, tornando-os muito mais flexíveis e duráveis. Um tipo de célula fotovoltaica de película fina é o silício amorfo (a-Si), que é produzido depositando finas camadas de silício sobre um substrato de vidro. O resultado é uma célula muito fina e flexível que utiliza menos de 1% do silício necessário para uma célula cristalina. Devido a essa redução de matéria-prima e a um processo de fabricação menos intensivo em energia, as células de silício amorfo são muito mais baratas de produzir. Sua eficiência, no entanto, é bastante reduzido porque os átomos de silício são muito menos ordenados do que em suas formas cristalinas, deixando 'ligações pendentes' que se combinam com outros elementos, tornando-os eletricamente inativos. Essas células também sofrem com uma queda de eficiência de 20% nos primeiros meses de operação antes da estabilização e, portanto, são vendidas com classificações de potência com base em sua produção degradada (LEE; EBONG, 2017).

De acordo com Sundaram, Shanks e Upadhyaya (2018), as células solares de película fina são geralmente classificadas de acordo com o material fotovoltaico utilizado:

- Células solares sensibilizadas por corantes (DSC) e outras células solares orgânicas.
- Gálio e selênio de cobre indiano (CIS ou CIGS)
- Telureto de cádmio (CdTe)
- Silício amorfo (a-Si) e outros silicões de película fina (TF-Si)

3.3.2 Tensão e corrente de uma célula solar

Os fabricantes fornecem as especificações dos principais parâmetros de uma célula solar considerando a condição padrão de teste (*standard test condition* ou STC), como descritas pela norma IEC 61215: 1000 W/m² de potência luminosa incidente total, com uma distribuição espectral conhecida como massa de ar 1.5 (air mass 1,5 ou AM 1,5) e temperatura das células de 25 °C. Estes parâmetros são:

Corrente de curto-circuito (I_{sc}): é o valor máximo da corrente de carga, igual, portanto, à corrente gerada por efeito fotovoltaico.

Tensão de circuito aberto (V_{oc}): é o máximo valor da tensão nos terminais do módulo fotovoltaico, quando nenhuma carga está conectada a ele.

Ponto de Máxima Potência (MPP): Para cada ponto na curva I-V, o produto corrente versus tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. Em arranjo fotovoltaico, para uma dada condição climática, só existe um ponto na curva I-V onde a potência máxima pode ser alcançada. Este ponto corresponde ao produto da tensão de potência máxima e corrente de potência máxima.

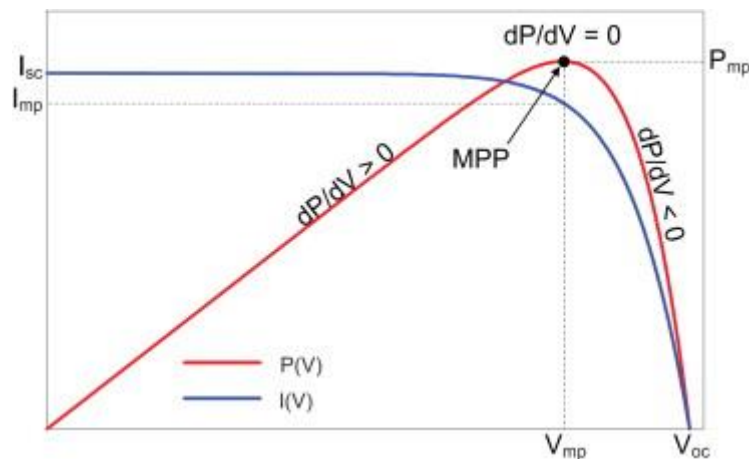
Tensão de máxima potência (V_{MP}): corresponde à tensão no ponto de máxima potência.

Corrente de máxima potência (I_{MP}): corresponde à corrente no ponto de máxima potência.

A curva I-V (Figura 4) de uma célula solar, pode ser descrita pelos modelos matemáticos de um gerador fotovoltaico ideal conforme Mcevoy, Markvart e Castaner (2011). Quando não existe nenhuma carga conectada, a corrente produzida é nula e

a tensão é igual a V_{OC} . Com um curto-circuito na saída, a tensão é zero, mas a corrente é igual a I_{SC} . Entre esses dois pontos, onde, em ambos os casos, a energia gerada é zero, existe um ponto de trabalho, chamado ponto máximo de potência. No entanto, a curva, assim como este ponto, não é fixo e varia dependendo de muitos parâmetros.

Figura 4 - Curva I-V/ Curva de potência, destacando o MPP

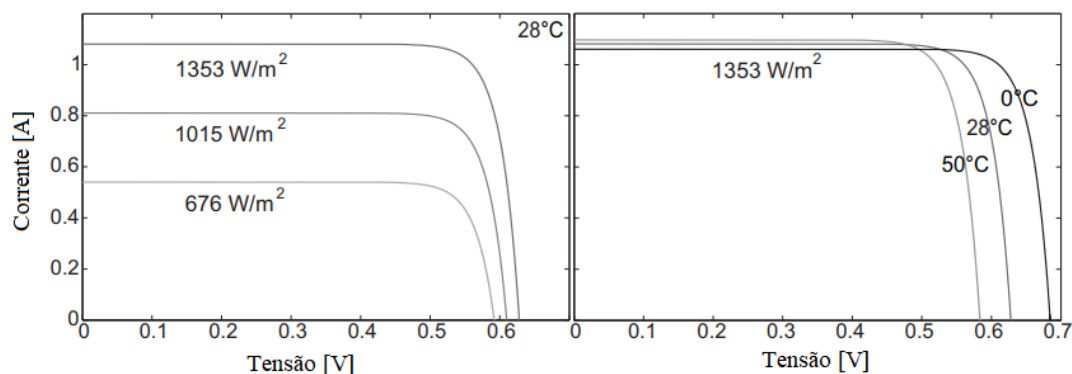


Fonte: (FAZELPOUR et al., 2013)

A corrente de uma célula solar é proporcional à sua área e varia quase linearmente com a intensidade da luz (Figura 5). Já a tensão tem uma pequena variação quando a intensidade da luz muda e é independente da superfície da célula, mas depende do material semiconductor empregado na sua fabricação. Para uma célula de silício de camada única, a tensão é por volta de 0,5 V, mas para uma célula de arseneto de gálio com junção tripla, aumenta até 2,27 V. Os valores importantes de V_{OC} e I_{SC} , são fornecidos nas folhas de dados da célula solar.

A temperatura também afeta as características das células solares. Com o seu aumento, a tensão diminui ligeiramente, enquanto a corrente eleva de forma insignificante. De maneira geral, a energia que uma célula solar pode fornecer é maior com temperaturas mais baixas, considerando as mesmas condições de irradiância (Figura 5).

Figura 5 - Variação da curva corrente / tensão de células solares com irradiância e temperatura (Silicon RWE-S-32)



Fonte: (NOTH et al., 2008)

3.3.3 Associação de células fotovoltaicas

Segundo Seguel (2009), uma única célula fotovoltaica, de maneira isolada, tem capacidade reduzida de produção de energia elétrica, geralmente entre 1 e 2 W, com uma tensão correspondente a 0,5 V e uma corrente de entre 2 e 4 A. Portanto, para atingir determinados níveis de tensão e corrente, faz-se necessária a associação de várias células, através de ligações série e paralelo, formando um arranjo fotovoltaicos.

3.3.3.1 Associação em série

Na conexão em série, o terminal positivo de uma célula fotovoltaica é conectado ao terminal negativo do outra, e assim por diante. Considerando células idênticas e submetidos à mesma irradiância, quando ligadas em série, as tensões são somadas e a corrente elétrica mantém-se a mesma, ou seja:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (1)$$

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

Este tipo de associação é representado na Figura 6(a), junto de sua curva característica I-V. Em caso de se associarem dispositivos em série com diferentes correntes de curto-circuito, a corrente elétrica da associação será limitada pela menor corrente. Entretanto, a associação de dispositivos fotovoltaicos de correntes diferentes não é recomendada na prática, pois pode causar superaquecimento.

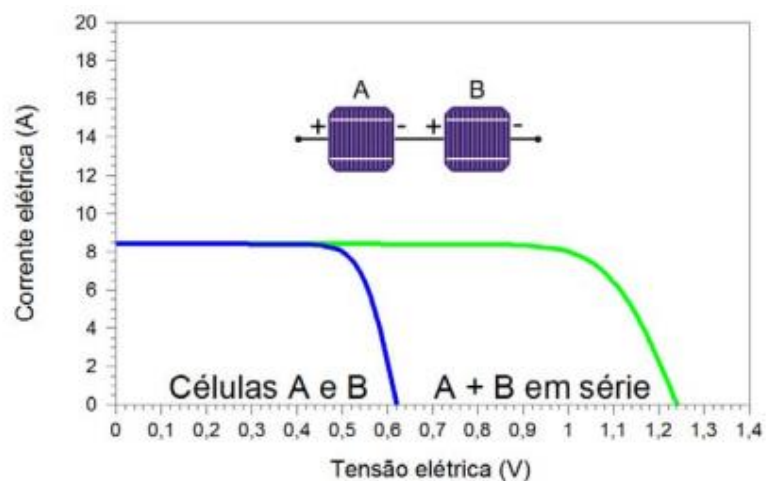
3.3.3.2 Associação em paralelo

Na associação em paralelo, os terminais positivos dos dispositivos são conectados entre si, assim como os terminais negativos. A Figura 6(b) demonstra a soma das correntes elétricas em células ideais conectadas em paralelo. As correntes elétricas são somadas, permanecendo inalterada a tensão. Ou seja:

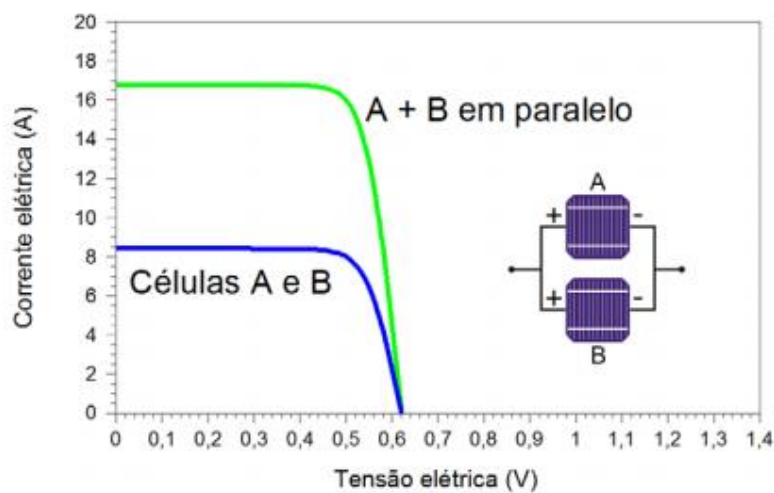
$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (3)$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (4)$$

Figura 6 - Curvas I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas (a) em série e (b) em paralelo.



(a)



(b)

Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

3.3.4 Modelagem fotovoltaica

Uma maneira de representar uma célula ou um painel PV é através de um circuito elétrico. Dependendo do nível de precisão e fidelidade exigido do modelo, ele pode se classificar com sendo ideal ou prático (com comportamento próximo ao modelo real).

3.3.4.1 Modelo ideal

O modelo simplificado com um diodo caracteriza a célula fotovoltaica como sendo ideal. Nele, a célula é considerada como uma fonte de corrente, desprezando as resistências em série e paralelo presentes no modelo prático.

A equação básica que descreve matematicamente a característica I-V de uma célula ideal é (VILLALVA, 2010):

$$I = I_{pv} - I_d \quad (5)$$

Onde I_{pv} é a corrente gerada pela incidência da luz e I_d é a equação do diodo de Shockley:

$$I_d = I_0 \left[\exp \frac{qV}{aKT} - 1 \right] \quad (6)$$

Onde:

I_0 = corrente de saturação reversa do diodo (A).

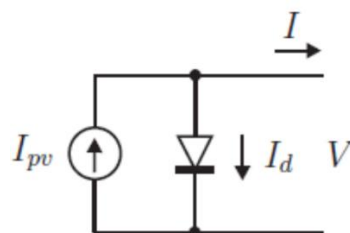
q = carga elementar do elétron (aproximadamente $1,6022 \times 10^{-19}$ C).

k = constante de Boltzmann (aproximadamente $1,3806 \times 10^{-23}$ J/K).

T = temperatura da junção p-n (K).

A Figura 7 retrata o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal descrita pela Equação 5:

Figura 7 - Modelo ideal de célula fotovoltaica



Fonte: (VILLALVA, 2010)

Entretanto, as equações apresentadas para o modelo ideal não representam as características I-V de um dispositivo prático.

3.3.4.2 Célula Fotovoltaica Prática

As características nos terminais de um painel fotovoltaico necessitam de um acréscimo de parâmetros na equação básica apresentada anteriormente. O modelo de painel PV com diodo único inclui uma corrente de fóton de fonte I_{pv} conectada a um diodo que emula a junção PN, bem como um resistor de shunt R_p e um resistor em série R_s . Logo, a corrente I que a célula fornece no modelo prático em função de V é (CHAIBI et al., 2018):

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \frac{V+R_s I}{V_t a} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (7)$$

Onde:

R_s = resistência série equivalente do painel (Ω).

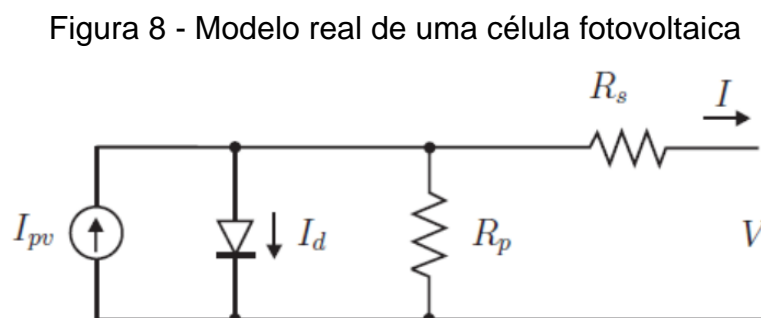
R_p = resistência paralela equivalente do painel (Ω).

V_t = tensão térmica do painel (V).

NS = número de células conectadas em série (adimensional).

A conexão de células em paralelo não é usual nos painéis fotovoltaicos comerciais, mas, quando realizada, é capaz de aumentar sua capacidade de corrente. Se o conjunto for composto por mais de uma célula em paralelo, então as correntes I_{pv} e I_0 deverão ser multiplicadas por NP (número de células conectadas em paralelo).

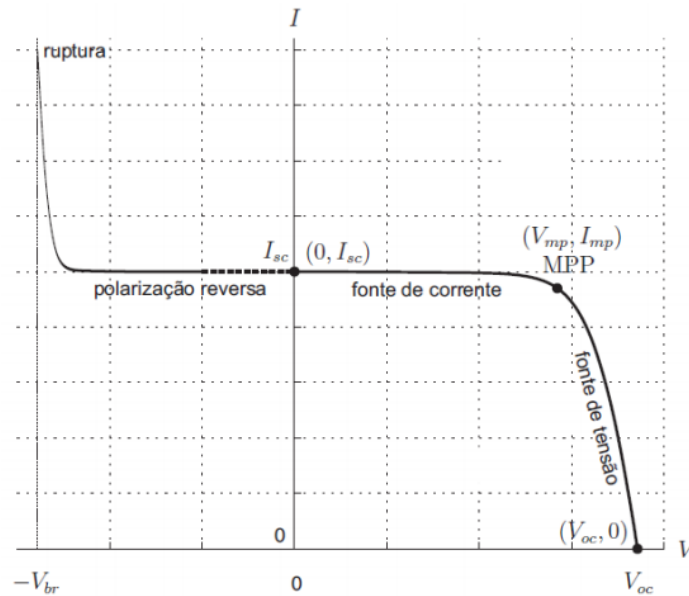
A Figura 8 retrata o modelo prático de um diodo para um dispositivo fotovoltaico, onde as resistências série e paralelo não são desprezadas:



Fonte: (VILLALVA, 2010)

Através da Equação 7, a curva $I \times V$ característica é gerada (Figura 9):

Figura 9 - Curva característica de uma célula prática



Fonte: (VILLALVA, 2010)

Nesse gráfico, três pontos estão destacados: corrente de curto-circuito $(0, I_{sc})$, tensão e corrente de máxima potência (V_{MP}, I_{MP}) e tensão de circuito aberto $(V_{OC}, 0)$. Tais pontos já foram comentados anteriormente.

A zona de polarização direta é dividida em duas regiões de operação do sistema fotovoltaico: fonte de corrente e fonte de tensão. Já na região de polarização reversa, a tensão sobre o dispositivo fotovoltaico é negativa, fazendo-o dissipar energia e até se danificar por aquecimento.

Um dispositivo fotovoltaico pode ser submetido a funcionar na região reversa, caso ele esteja inserido num conjunto com vários painéis em série sem a utilização de diodos paralelos. Entretanto, não se deve operar nessa região, pois o dispositivo pode alcançar a tensão de ruptura V_{br} e ser destruído por aquecimento.

Para simplificar, o modelo de um diodo é usado neste trabalho. Este modelo fornece um bom compromisso entre precisão e simplicidade, e tem sido utilizado por vários autores em trabalhos anteriores, às vezes com simplificações, mas sempre com a estrutura básica composta por uma fonte de corrente e um diodo paralelo. O modelo de um diodo é mais adequado para projetistas de eletrônica de potência que procuram um modelo fácil e eficaz para a simulação de painéis fotovoltaicos com conversores de potência (ZAKZOUK et al., 2013).

3.4 Rastreador de Ponto de Máxima Potência (MPPT)

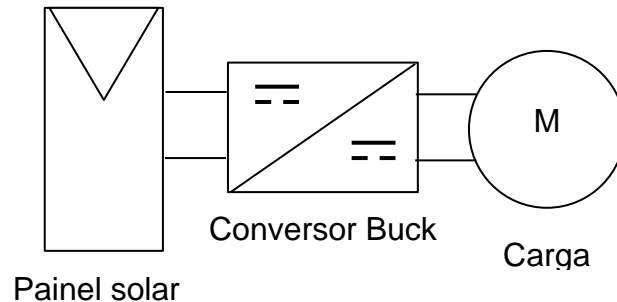
A energia gerada durante o voo de uma aeronave movida a energia solar, depende amplamente: da corrente fornecida para a carga, temperatura, época do ano, hora do dia, inclinação das células em relação ao sol e o nível de nebulosidade (FAZELPOUR et al., 2013). Mediante a esse comportamento imprevisível da energia solar, a irradiância, assim como a potência de saída extraída dos painéis, não é constante durante o voo. Além disso, devido a limitação de área dos painéis, a tensão de saída é relativamente baixa, sendo necessário a otimização da energia absorvida.

Segundo Bhatnagar e Nema (2013), a eficiência em um sistema fotovoltaico pode ser melhorada se o painel for operado intencionalmente no MPP, independente das condições atmosféricas variáveis. Esse tipo de controle pode ser feito combinando corretamente a fonte fotovoltaica com a carga, isso para qualquer condição climática, obtendo assim a energia máxima gerada. O método pelo qual ocorre o rastreamento eletricamente do MPP na curva P-V é denominado de MPPT. Basicamente, existem duas formas pelas quais a potência máxima pode ser extraída da matriz fotovoltaica: o rastreamento mecânico e o rastreamento elétrico. O rastreamento mecânico trata-se de um método físico, no qual o painel é orientado variando seu ângulo de posicionamento ao longo do dia, buscando manter sua superfície perpendicular ao sol. Esse tipo de orientação pode ocorrer de modo manual ou automático. O rastreamento elétrico (MPPT) é o processo no qual a curva I-V do painel é rastreada para o MPP, que ocorre no joelho da curva, como mostra na Figura 9. Dispositivos de eletrônica de potência são usados para rastrear o MPP, alcançando a máxima eficiência, além de poderem converter energia CC em CA, de acordo com as exigências do sistema projetado. A tensão de operação típica em motores CC sem escova para aeronaves controladas por rádio é de aproximadamente 11V. Por esse motivo, o MPPT projetado para esse projeto, deve adotar uma topologia com um conversor de impulso.

Um conversor de energia, em sua grande maioria, o conversor DC/DC (buck / boost / buck-boost), como mostra na Figura 10, é usado entre a fonte PV e a carga, para atingir o MPPT. Esses conversores utilizam algum algoritmo para garantir, que o módulo PV opere sempre no MPP. Um microcontrolador ou um DSP (do inglês *Digital Signal Processor*) é utilizado para implementar esse algoritmo e fazer o

controle do conversor. Para extrair a potência máxima que o sistema pode fornecer, vários métodos de MPPT são descritos na literatura (BHATNAGAR; NEMA, 2013).

Figura 10 - Esquema da fonte de alimentação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para obter voos de longa duração é fundamental que o MPPT seja bem projetado. As especificações para se projetar o circuito, devem ocorrer de acordo com o objetivo do voo, além das condições elétricas na qual VANT irá operar. Como descreve Haque e Zaheeruddin (2016), o design do circuito MPPT pode incluir os seguintes recursos:

- O monitoramento da tensão e corrente de entrada e saída, bem como a temperatura do painel;
- A capacidade de transmitir esses dados;
- Ajustes contínuos do circuito para obter a máxima eficiência;
- A capacidade de desligar ou reduzir a potência para evitar a falha do componente;
- Comutadores físicos para isolar o MPPT da matriz solar e da bateria em uma situação de emergência.

3.4.1 Componentes do MPPT

Baseado na secção anterior, fica claro que os microcontroladores, os conversores CC-CC e os meios empregados para medir a tensão e a corrente são os principais componentes do circuito MPPT. Com isso, a escolha adequada desses componentes é essencial para um voo mais duradouro.

3.4.1.1 Microcontroladores

Os Microcontroladores são dispositivos compostos por semicondutores. Sua principal função será controlar o ganho do conversor CC-CC, além de implementar o algoritmo MPPT. A fim de não comprometer a energia que será fornecida para os motores é fundamental que seu consumo seja baixo. Além disso, a quantidade de saídas deve ser adequada a necessidade do controlador de velocidade dos motores.

3.4.1.2 Dispositivos de medição de tensão e corrente

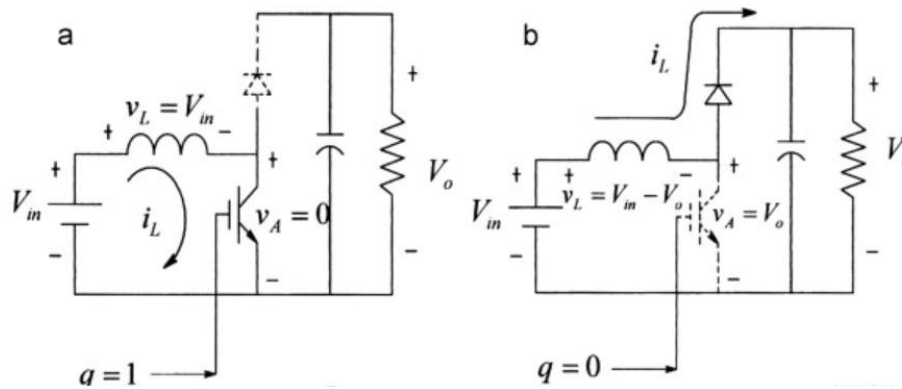
Para realizar a medição da tensão, dois resistores podem ser utilizados. O valor de tensão medido será convertido em um sinal digital pelo próprio conversor analógico-digital embutido no microcontrolador. Para a medição da corrente, pode ser utilizado um resistor com derivação. A queda de tensão decorrente do resistor shunt por ser reduzida, precisa passar por um amplificador de detecção de corrente para alimentar uma entrada analógica do microcontrolador. A utilização de um filtro diferencial nas entradas também é essencial para melhorar a qualidade da saída do amplificador.

3.4.1.3 Conversor CC-CC

Os conversores CC-CC têm a função de converter um nível de tensão CC em outro. Nesse tipo de circuito, elementos como, indutores e capacitores armazenam temporariamente a energia de entrada para liberá-la com uma tensão diferente. Para efetuar o controle, o algoritmo realiza o chaveamento de uma chave estática periodicamente (KAZIMIERCZUK, 1989). A Figura 11 mostra o funcionamento de um conversor boost com a chave nos seus dois estados de condução. Na Figura 11(a) pode se observar que com a chave fechada, o diodo fica polarizado reversamente e a corrente fornecida pela fonte armazena energia em um campo magnético (indutor).

Ao abrir o interruptor (ver Figura 11(b)), o diodo fica polarizado diretamente, fazendo com que a energia armazenada no indutor seja direcionada para a carga. O ciclo de trabalho vai representar a fração do tempo em que a chave está ligada dividido pelo período da forma de onda aplicado ao gate do comutador. Quando o ciclo de trabalho for elevado, a tensão de saída aumenta, e de maneira análoga, se o ciclo de trabalho for reduzido, a tensão na saída diminui.

Figura 11 - Funcionamento do conversor boost



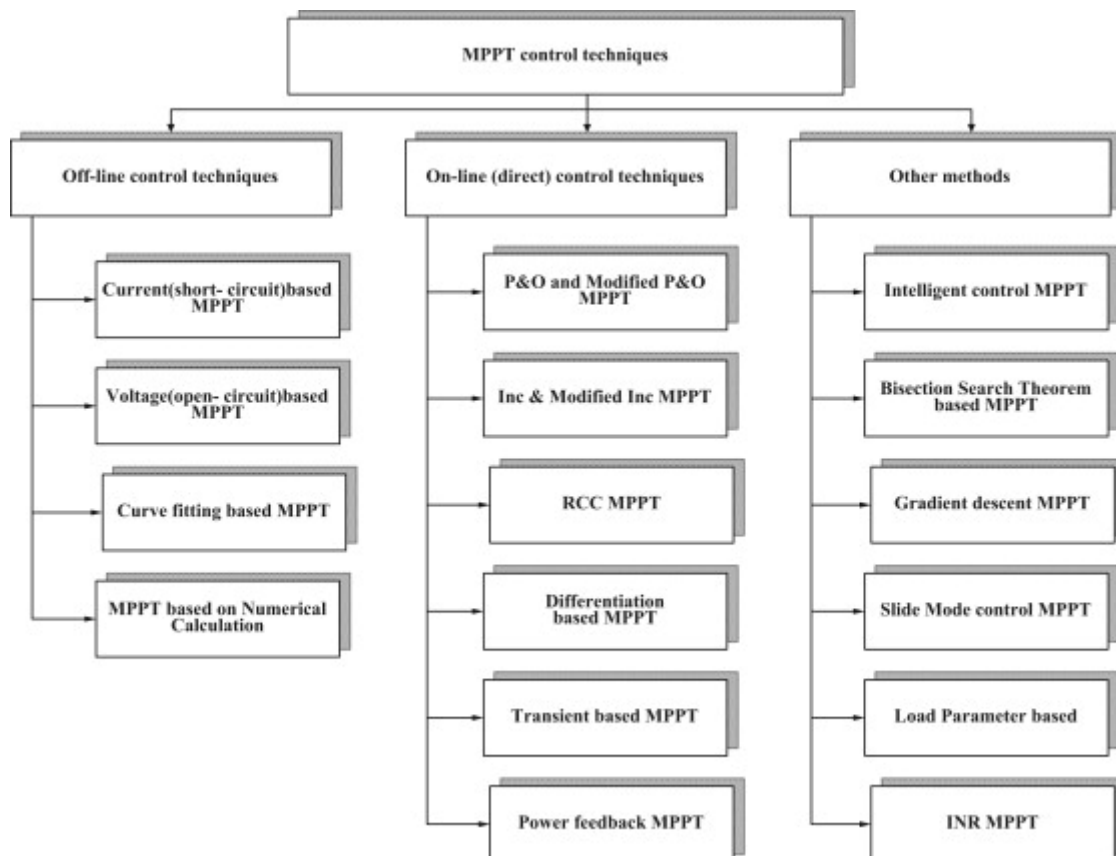
Fonte: (FAZELPOUR et al., 2013)

3.4.2 Técnicas MPPT

Para a redução das perdas e um bom tempo de voo, não basta otimizar apenas o designe do hardware, mas também o algoritmo deve ser ajustado para ter uma rápida adaptação às variações de irradiância e uma boa precisão de rastreamento. Segundo Noth, Corke e Siegwart (2008), MPPT bem projetado deve ter uma eficiência acima de 95%, podendo chegar a 99% nos melhores casos.

São inúmeras as formas de classificar as técnicas MPPT. Um exemplo é dividir de acordo com a quantidade de variáveis de entrada utilizadas para rastrear o MPP. De acordo com Bhatnagar e Nema (2013), também podem ser classificados com base nos parâmetros necessários para rastrear o MPP, separados em três grupos: técnicas offline (indiretas), online (diretas) e outras técnicas. A Figura 12 mostra essa classificação:

Figura 12 - Classificação das técnicas MPPT



Fonte: (BHATNAGAR; NEMA, 2013)

Em geral, as técnicas de controle offline utilizam dados técnicos dos painéis fotovoltaicos a fim de estimar o MPP. Nesses dados contém informações prévias, como as curvas I-V e P-V em diferentes condições climáticas, diferentes modelos matemáticos, entre outros. Já os métodos online, utilizam dados fornecidos em tempo real, como a tensão e corrente elétrica nos painéis. Estes métodos não requerem a medição de temperatura ou radiação solar, nem mesmo informações sobre o modelo do painel. Os métodos offline são bem mais econômicos, porém menos eficazes quando comparados com os métodos online e outros. Outros métodos são a combinação ou a modificação desses métodos ou métodos com base em cálculos indiretos.

3.4.2.1 Algoritmo de condutância Incremental

Segundo Lopes (2020) o algoritmo de Condutância Incremental (INC) baseia-se no cálculo da derivada da curva P-V do painel fotovoltaico. Quando o valor da derivada é positivo, significa que o ponto de operação se encontra na subida da curva. Por outro lado, quando a derivada é negativa, o ponto de operação encontra-se na descida da curva. O ponto de máxima potência é alcançado quando a derivada é nula. Sua estrutura pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\text{No MPP} \quad \frac{\Delta P}{\Delta V} = 0 \quad (8)$$

$$\text{A esquerda do MPP} \quad \frac{\Delta P}{\Delta V} > 0 \quad (9)$$

$$\text{A direita do MPP} \quad \frac{\Delta P}{\Delta V} < 0 \quad (10)$$

Sendo assim, o sistema busca encontrar o ponto na curva de potência onde $\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0$. Desenvolvendo esta expressão, tem-se:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V.I)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} \approx I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (11)$$

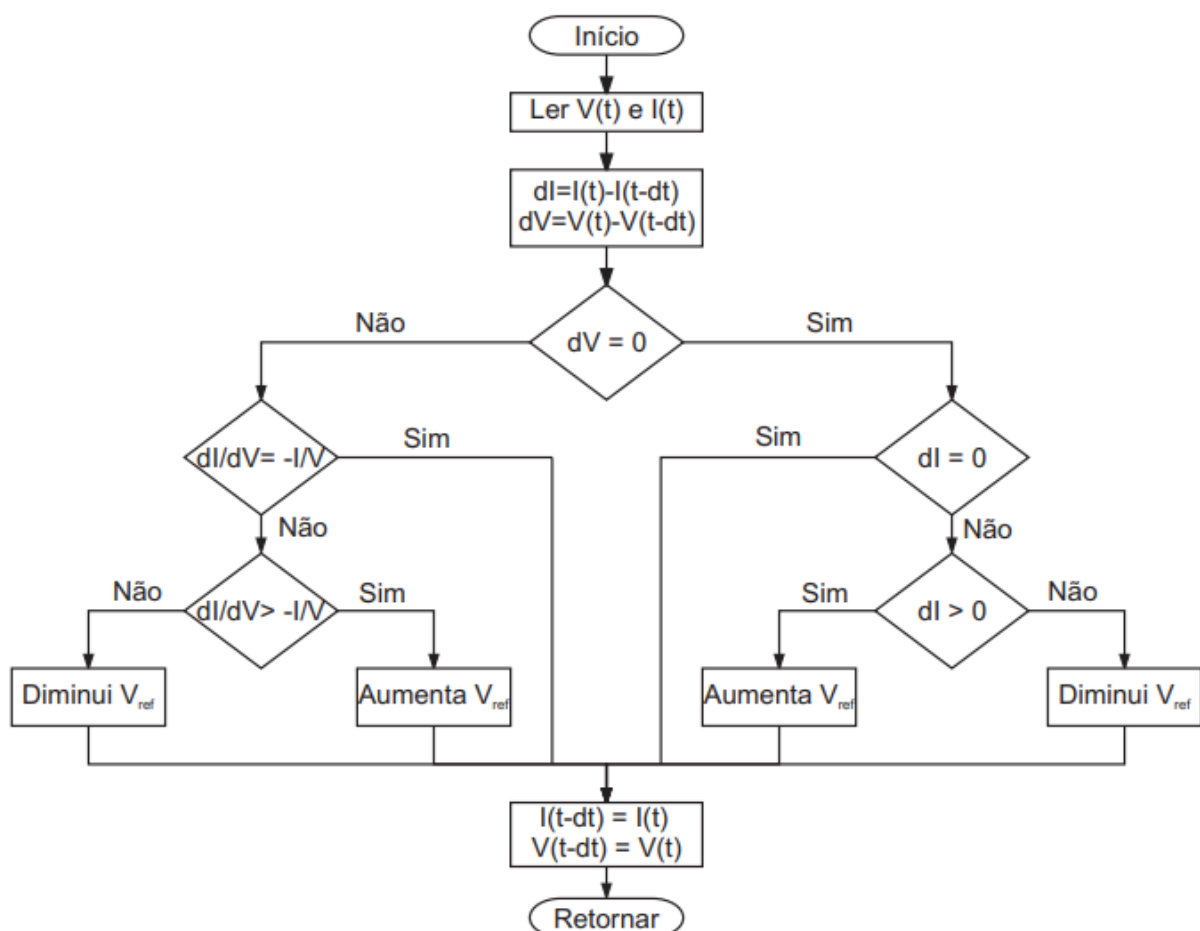
Portando, observa-se que:

- Se $I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0$, o ponto de operação encontra-se no ponto de máxima potência;

- Se $I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} > 0$, o ponto de operação encontra-se à esquerda do ponto de máxima potência;
- Se $I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} < 0$, o ponto de operação encontra-se à direita do ponto de máxima potência;

Baseado na análise anterior, toma-se a decisão de incrementar ou decrementar o valor da tensão do dispositivo fotovoltaico. Com base nas equações anteriores, o método Condutância Incremental convencional é apresentado na Figura 13:

Figura 13 - Fluxograma do método de MPPT Condutância Incremental

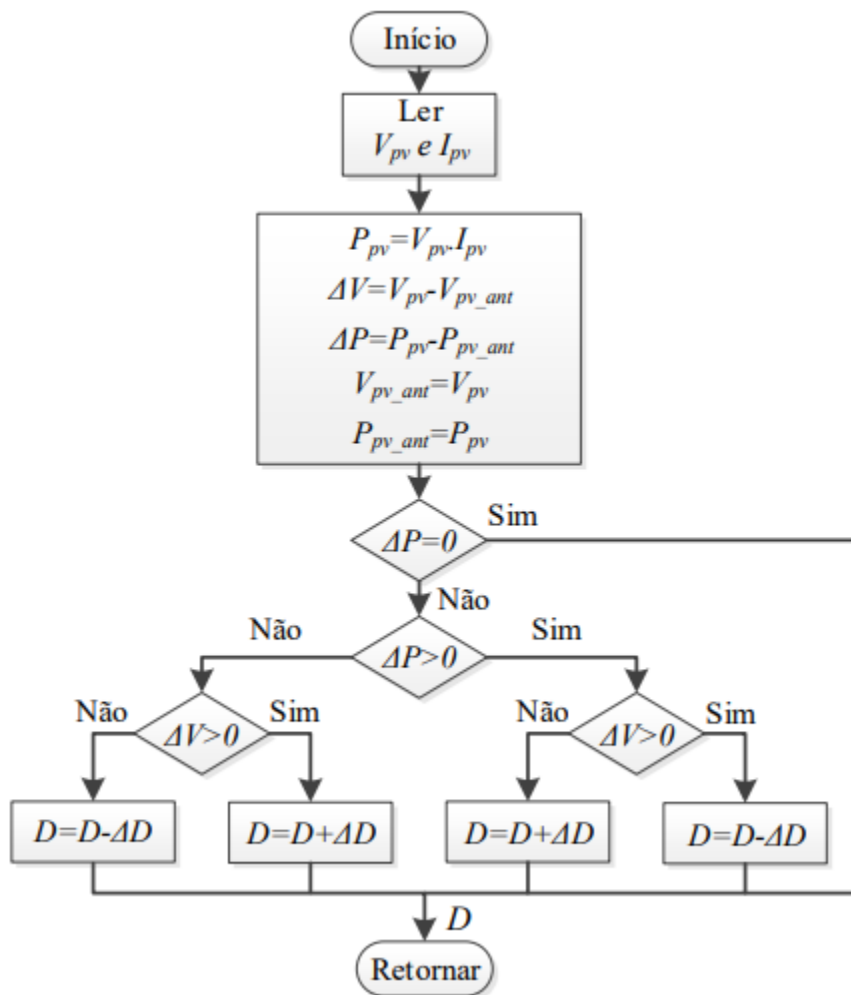


Fonte: (BALBINO, 2017)

3.4.2.2 Algoritmo Perturbe e Observe

O algoritmo P&O é um dos métodos tradicionais mais empregados para realizar o MPPT, e também é conhecido como método da escalada (*Hill-Climbing*) (D'SOUZA et al., 2010). Nesta técnica, uma pequena perturbação é introduzida, causando a variação de potência do módulo fotovoltaico. A potência de saída fotovoltaica é medida periodicamente e comparada com a potência anterior. Se a potência de saída aumentar, o mesmo processo é continuado, caso contrário, a perturbação é revertida. Este sinal de saída do algoritmo pode usar como referência a corrente, a tensão ou o próprio sinal da razão cíclica do conversor buck, dependendo da estratégia empregada. A tensão é elevada ou diminuída para verificar se a potência aumentou ou reduziu. Quando um aumento na tensão leva a um aumento na potência, isso significa que o ponto de operação do módulo PV está à esquerda do MPP (SALMAN; AI; WU, 2018). Portanto, são necessárias mais perturbações do lado direito para alcançar o MPP. Por outro lado, se um aumento na tensão levar a uma diminuição na potência, isso significa que o ponto de operação do módulo PV está à direita do MPP e, portanto, mais perturbações à esquerda são necessárias para atingir o MPP. O microcontrolador calculará então a potência P_{novo} existente na saída medindo a tensão e a corrente, e comparará esta potência calculada com a potência $P_{anterior}$ medida anteriormente. Se P_{novo} for maior que $P_{anterior}$, o ciclo de trabalho PWM é aumentado para extrair a potência máxima do painel PV. Se P_{novo} for menor que $P_{anterior}$, o ciclo de trabalho é reduzido para garantir que o sistema volte à potência máxima anterior. Segundo Dabra et al. (2017) este algoritmo MPPT é simples, fácil de implementar e de baixo custo com alta precisão. O fluxograma do algoritmo P&O é demonstrado na Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma do método de MPPT Perturbe e Observe



Fonte: Adaptado de Salman et al. (2018)

3.4.3 Análise e comparação das diferentes técnicas de MPPT

Bhatnagar e Nema (2013) fazem a comparação entre diferentes técnicas MPPT com base em diversos critérios, como: sensores utilizados, complexidade, precisão, fator de rastreamento, velocidade e eficiência com sombreamento parcial. A Tabela 1 mostra a comparação de diferentes métodos com base nesses critérios.

Tabela 1 - Comparação de diferentes técnicas de MPPT

Técnica MPPT	Sensor	Complexidade	Precisão do rastreamento	Fator de rastreamento de energia	Velocidade de rastreamento transiente	Eficiência com sombreamento parcial
VMPPT	V	S	baixa	baixo	lento	não
CMPPT	I	S	baixa	baixo	lento	não
Look up table	V,I	S	baixa	baixo	lento	não
Curve fitting	V	S	baixa	baixo	lento	não
P&O	V,I	S	média	bom	média	não
Modified P&O	V,I	C	alta	muito bom	rápida	sim
INC	V,I	M	alta	bom	rápida	sim
Modified INC	V,I	C	muito alta	muito bom	rápida	sim
INR	V,I	C	alta	bom	rápida	não
RCC	V,I	C	alta	muito bom	rápida	sim
Power feedback	V,I	S	alta	bom	média	não
BST	V,I	C	alta	bom	média	não
Slide mode control	V,I	M	média	muito bom	rápida	sim
Temperature	V, temperatura	M	alta	baixo	média	não
Gradient descent	V,I	M	alta	bom	média	não
Numerical based	V,I	C	alta	bom	média	não
FLC	V,I	C	muito alta	muito bom	rápida	sim
ANN	V,I	C	muito alta	bom	rápida	sim
PSO	V,I	C	muito alta	bom	rápida	sim
Load parameters based	V,I	C	alta	baixo	lento	não
β -Method	V,I	C	alta	bom	rápida	sim

Three point MPPT	V,I	C	alta	bom	rápida	não
Parasitic capacitance	V,I	C	muito alta	bom	média	sim
One cycle control	I	M	alta	bom	rápida	não
Variable inductor	V,I	M	média	bom	média	não
Current sweep	V,I	C	média	baixo	média	não
Array reconfiguration	V,I	C	baixa	baixo	lento	sim
Linearization based	V,I	S	muito alta	bom	rápida	não
State space based	V,I	C	alta	bom	média	sim
PV output senseless	I	S	alta	bom	média	sim
Biological swarm chasing	V,I	C	muito alta	bom	rápida	sim
System oscillation control	V	C	alta	bom	média	não
DC-link capacitor droop	V,I	C	alta	muito bom	rápida	sim

Fonte: (BHATNAGAR; NEMA, 2013)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo visa aprimorar o protótipo desenvolvido por Velandia (2018), em sua pesquisa. As principais melhorias trabalhadas são:

- a implementação do controlador de voo (permitido a operação do drone a uma certa distância);
- a aplicação de um sistema MPPT, para melhorar a eficiência energética, permitindo maior tempo de voo.

Em primeiro lugar, será descrito o sistema de propulsão, assim como a estrutura usada no protótipo, posteriormente, são explicados os componentes junto com os materiais utilizados. Em uma segunda parte, será descrito todo o método de concepção do circuito MPPT, além de sua simulação considerando os parâmetros do drone solar.

4.1 Sistema de propulsão

O sistema de propulsão, ou seja, os motores, foram escolhidos com base em um estudo de 4 diferentes tipos de motores sem escovas (*outrunner*) ou motores *Brushless outrunner*. De acordo com Velasco (2014) a principal virtude destes, é que têm uma elevada relação potência sobre massa. Além disso, na grande maioria dos UAVs usam estes motores e, estão comercialmente disponíveis.

O principal critério foi a tensão necessária para seu funcionamento e o consumo de corrente, assim como o impulso gerado no momento de consumo desta corrente.

Para este estudo, foram escolhidos quatro motores de diferentes KV (Kilo volt), conforme a Tabela 2, junto com suas respectivas hélices com as quais apresentam melhor eficiência.

De acordo com a tensão necessária dos diferentes tipos de motores (Tabela 2), foram escolhidos: aqueles que usam 11,1 V ou menos, visto que para um motor que usa 14,8 V, seria necessário um arranjo fotovoltaico 33% maior do que o arranjo de 11,1 V, e maior quantidade de células solares, o que faria com que o painel solar ficasse com um maior tamanho e massa. Em seguida, o critério usado foi o consumo de corrente e o empuxo gerado. Ao observar o empuxo de 183 g gerado pelos 6.5 A

consumidos pelo motor emax 1306, foi percebido ser muito menor quando comparado com os motores emax 2205 e 2213, o levando a ser descartado.

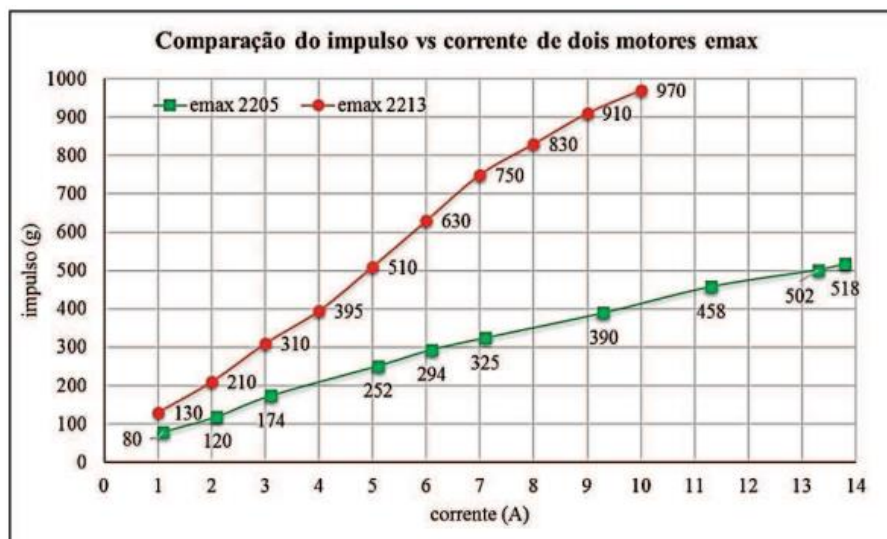
Finalmente, em comparação aos valores apresentados pelos motores emax 2205 e 2213 mostrados na Figura 15, pode-se observar que o impulso gerado pelo motor emax 2213 é 87% maior do que o 2205, e consome 34% menos corrente do que o 2205, razão pela qual, foi escolhido o motor emax 2213 mostrado na Figura 16 junto com suas características, para o desenvolvimento do multirrotor.

Tabela 2 - Características dos motores Brushless

motor	emax 1306		emax 2205		emax 2213		rctimer 5010	
hélice	GF3040		HQ1045		10x5.5		17x5.5	
Kv	3300		2300		935		360	
tensão (V)	11,1		11,1		11,1		14,8	
poder	corrente (A)	impulso (g)	corrente (A)	impulso (g)	corrente (A)	impulso (g)	corrente (A)	impulso (g)
10%	0,7	30	1,1	80	1	130	1,8	400
20%	1	51	2,1	120	2	210	2	450
30%	2	89	3,1	164	3	310	3,2	610
40%	3	118	5,1	252	4	395	3,8	680
50%	4,1	135	6,1	294	5	510	4,2	740
60%	5,2	168	7,1	325	6	630	4,7	830
70%	5,7	171	9,3	390	7	750	5,3	910
80%	6,2	176	11,3	458	8	830	6,7	995
90%	6,3	180	13,3	502	9	910	8,1	1100
100%	6,5	183	13,8	518	9,1	970	8,5	1170

Fonte: (VELANDIA, 2018).

Figura 15 - Comparação de dois motores.



Fonte: (VELANDIA, 2018).

Figura 16 - Características do Motor Brushless Emax Mt2213/935Kv

	Kv	935
	Massa	55g
	Diâmetro do motor	27,9mm
	Altura do motor	39,7mm
	Bateria	(3s ¹³ o 4s) lipo ¹⁴
	Máximo empurrão empuxo	750g
	ESC recomendado	Min. 18A
	Hélice recomendada	1045

Fonte: (VELANDIA, 2018).

4.2 Sistema de controle

Considerando-se, que nos veículos aéreos não tripulados, é necessário fazer uso de um controle de rádio, já que segundo Silva González (2015) os VANT não são totalmente autônomos, devem ter sempre um piloto que controle a aeronave remotamente. Por isso, um sistema de controle de rádio é usado, por meio do qual o piloto pode transmitir ao IMU, placa mãe ou placa controle de voo os movimentos que deve fazer a aeronave em certos momentos.

De acordo com o mencionado, o controle de rádio consiste em dois componentes: um transmissor (controle) e um receptor. Será utilizado neste projeto o rádio FlySky FS-T6 2.4 Ghz, mostrado na Figura 17 (a), encarregado de transmitir ao receptor FlySky FS-R6B 2.4 Ghz, mostrado na Figura 17 (b), os comandos (sinais) dados pelo piloto, movendo as alavancas do controle. Por sua vez, o receptor é o encarregado de transmitir os sinais para o IMU, placa mãe ou controladora de voo, transformando-os em movimentos ou tarefas para a aeronave.

Figura 17 - (a). Emissor, (b). Receptor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

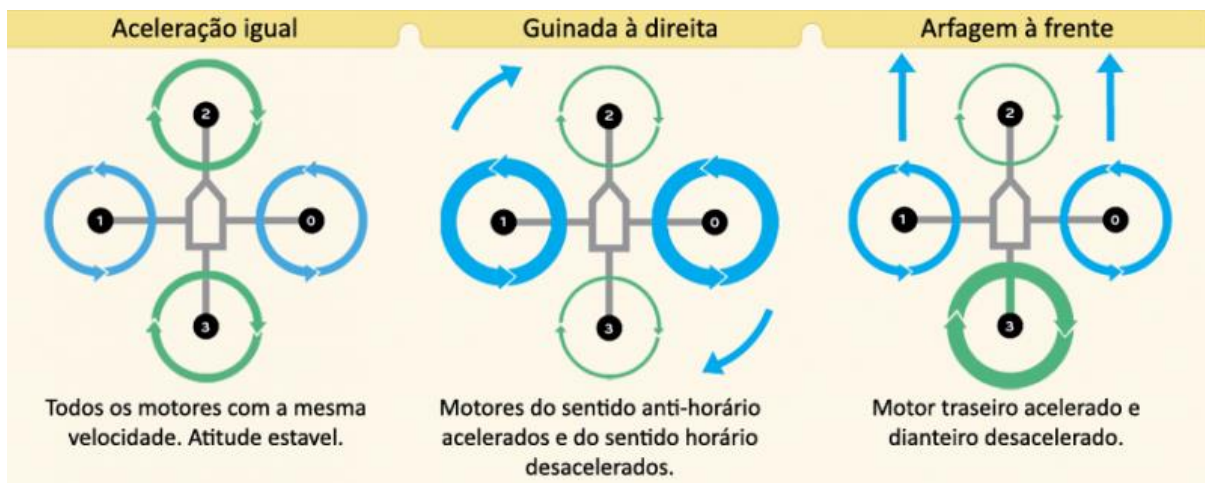
O controle remoto trabalha basicamente com os seguintes comandos: *throttle* (aceleração), *pitch* (arfagem), *roll* (rolagem) e *yaw* (guinada), mostrados na Figura 18. Estes são os movimentos básicos de toda aeronave e se apresentam de acordo com coordenadas de um plano cartesiano, conforme mostra a Figura 19.

Figura 18 - Comandos do controle remoto.



Fonte: (VELANDIA, 2018).

Figura 19 - Movimentos básicos de um drone

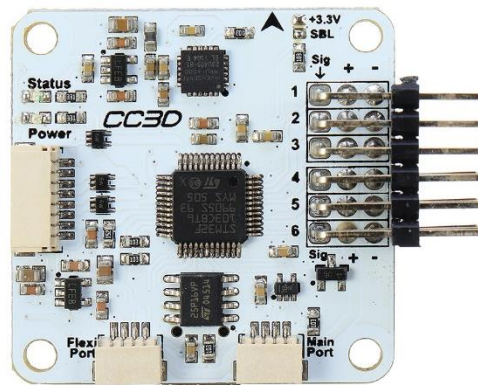


Fonte: (RIBEIRO, 2016).

A próxima etapa foi a escolha da placa controladora de voo, que é responsável pela transformação de sinais, captados diretamente do rádio pelo receptor e interpretando-os nos diferentes movimentos que deve executar o drone, aceleração, arfagem, rolagem e guinada. O modelo escolhido foi a controladora CC3D (ver Figura

20) por possuir baixo peso (apenas 20g) e possuir todas as funcionalidades necessárias para o voo.

Figura 20 - Controladora de voo CC3D

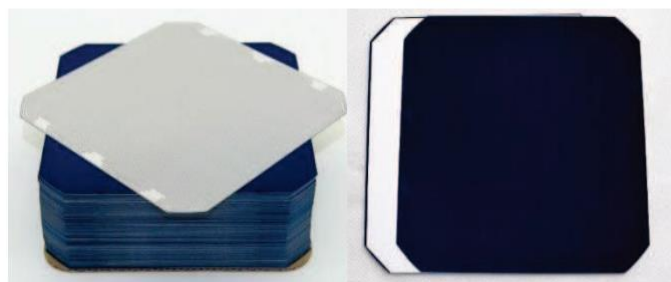


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Componentes do protótipo

No protótipo, foram empregadas células solares monocristalinas por serem a melhor opção de células solares disponíveis no mercado, pois apresentam a maior eficiência segundo Brito (2008) em comparação às células policristalinas. A célula solar usada foi a MAXEON™ GEN II, mostrada na Figura 21, da companhia Sunpower, que é uma célula solar de fácil aquisição comercial, além de ter uma das maiores eficiências no mercado, apresentando uma tensão de 0,58V e 6A cada, além de ser uma célula semiflexível.

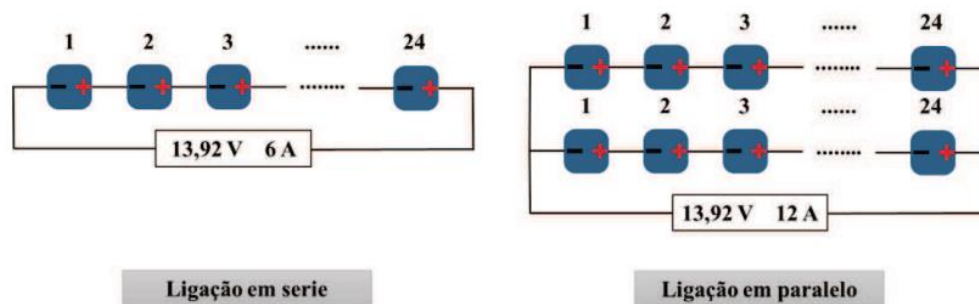
Figura 21 - Célula solar MAXEON™ GEN II da Sunpower.



Fonte: (VELANDIA, 2018).

Em seguida, foi feito o cálculo da quantidade de células a serem usadas no protótipo, já que foi decidido utilizar uma tensão maior que 12 V, a fim de diminuir perdas de tensão no momento da realização de soldagem das células, assim como no momento de levar ao campo e receber radiação. A Figura 22, mostra o arranjo fotovoltaico do protótipo que apresenta duas matrizes, cada uma com 24 células ligadas em série, obtendo-se teoricamente por cada matriz 13,92 V e 6 A. Em seguida, as duas matrizes foram ligadas em paralelo, obtendo-se um total para o arranjo de $V_{oc} = 13.92 \text{ V}$ e $I_{sc} = 12 \text{ A}$.

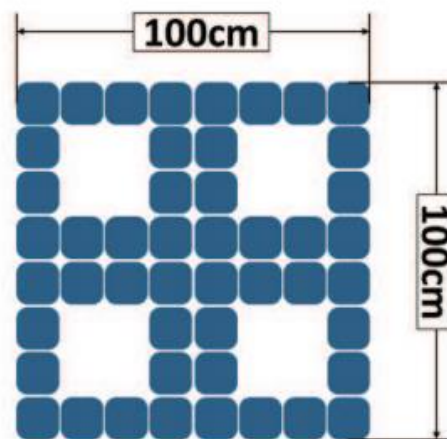
Figura 22 - Arranjo fotovoltaico do protótipo



Fonte: (VELANDIA, 2018).

Foi projetado um arranjo fotovoltaico que permitisse uma adequada incorporação dos motores junto com a estrutura, conforme Figura 23:

Figura 23 - Esboço do arranjo fotovoltaico



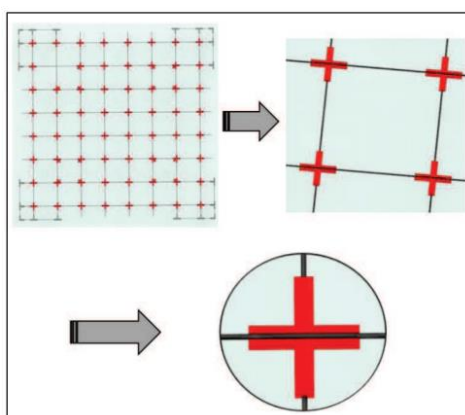
Fonte: (VELANDIA, 2018).

O arranjo fotovoltaico possui um orifício em cada um dos seus cantos, para que os motores fossem incorporados no centro dos orifícios, e permitisse a livre passagem do fluxo de ar, além de não interromper o impulso gerado pelos motores.

A estrutura foi projetada usando o programa de modelamento CAD Solid Edge st10, visando primeiramente atender, ao tamanho do arranjo fotovoltaico.

A estrutura foi construída usando varas de fibra de carbono de 2 mm de espessura, que permitiu a fácil incorporação com o arranjo fotovoltaico e os motores. As varas de fibra de carbono foram ligadas em forma de malha, usando em cada intercepção peças impressas em PLA, na forma de x (Figura 24).

Figura 24 - Detalhe da estrutura suporte.



Fonte: (VELANDIA, 2018).

4.4 Montagem da controladora de voo

Com a parte estrutural e alimentação dos motores concluída por Velandia (2018), foi realizado a montagem e configuração da controladora de voo, juntamente com o rádio controle e receptor de sinal. O primeiro passo foi o *bind* do rádio com o receptor para que os comandos fossem recebidos pela aeronave. O receptor da Fly Sky FS-R6B dispõe de 6 canais de comunicação, porém só foram necessários 4 para a realização dos movimentos de voo como demonstrados na Figura 18.

O teste de comunicação foi realizado ligando o receptor direto na placa do Esc (driver dos motores), para constatar a transmissão entre o rádio e o drone. Todas as entradas do Esc foram interligadas para que os quatro motores pudessem ser acionados por apenas um canal, como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Teste de comunicação entre o rádio e o drone

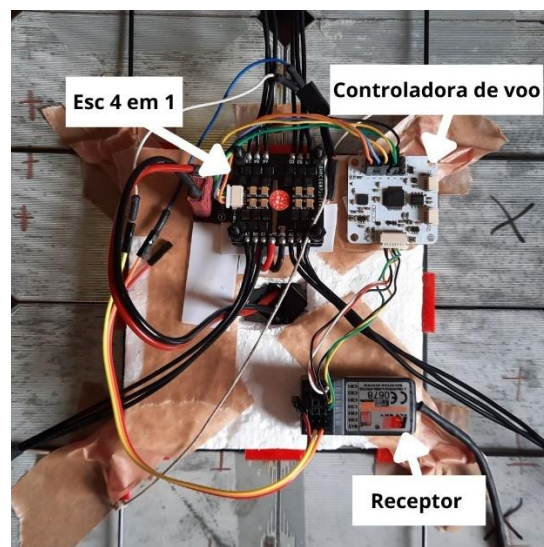


Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi observado que o drone possuía bastante propulsão, porém o teste de voo se tornava inviável já que a controladora de voo não estava conectada e sem a mesma o protótipo poderia ser avariado.

O próximo passo foi a montagem e configuração da controladora de voo. A Figura 26 mostra como foi disposto cada componente na parte de baixo do drone.

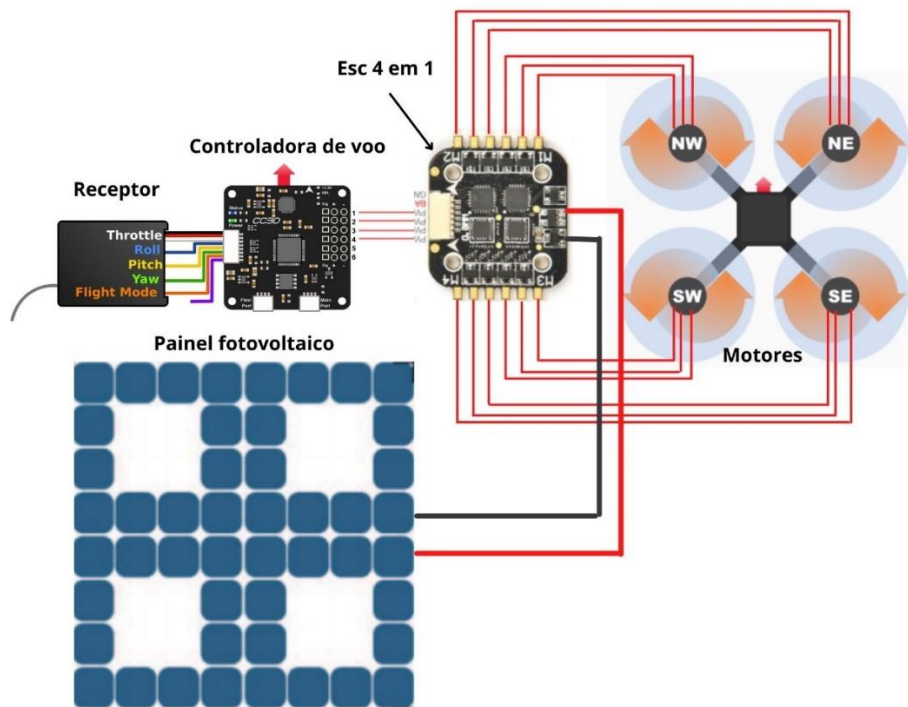
Figura 26 - Montagem dos periféricos



Fonte: Elaborada pelo autor.

O Figura 27 mostra o diagrama elétrico de cada componente.

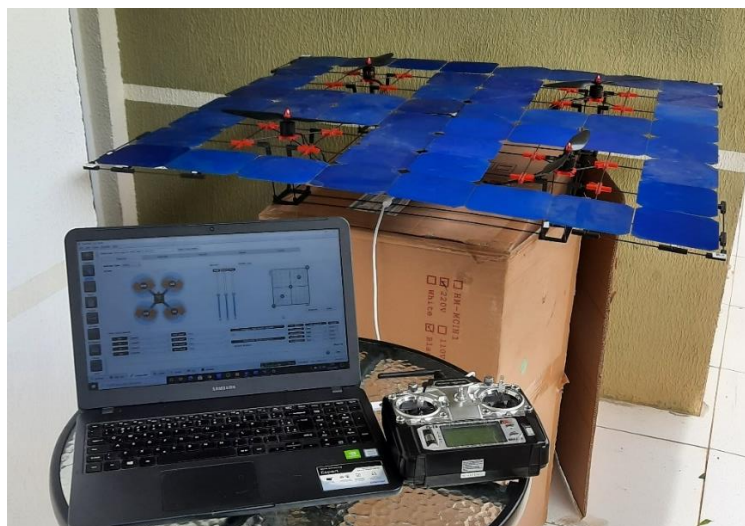
Figura 27 - Diagrama dos dispositivos elétricos do drone



Fonte: Elaborada pelo autor.

O software utilizado para configurar a controladora de voo foi o LibrePilot. Nesse processo foi realizada a atualização de firmware, a configuração dos parâmetros de comunicação, a configuração do rádio e a calibração do giroscópio.

Figura 28 – Configuração da controladora de voo



Fonte: Elaborada pelo autor.

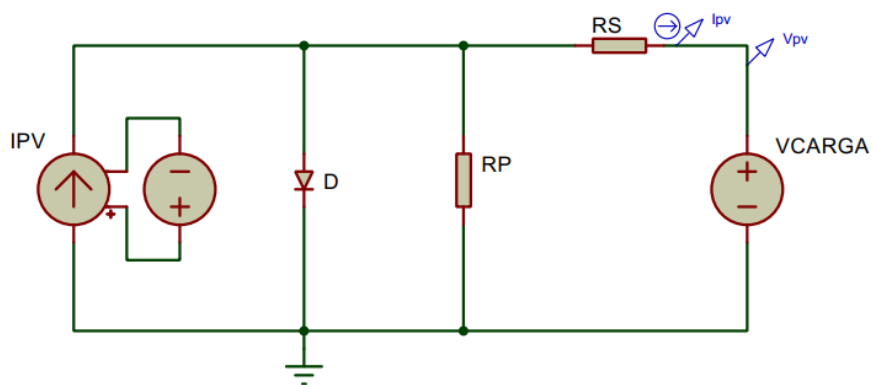
4.5 Aplicação do MPPT:

Para implementação do hardware do MPPT se faz necessário a utilização de um conversor de energia CC/CC. O conversor selecionado é o do tipo buck, devido ao fato de que a tensão gerada no painel é maior que a tensão necessária para a carga.

4.5.1 Modelo do painel fotovoltaico usando o Proteus

Conforme Motahhir et al. (2018), foi criado um modelo simulado do painel PV, para teste do MPPT, assim como o dimensionamento do circuito de controle e potência do conversor CC. Foi utilizado o modelo de um diodo e dois resistores para simular o comportamento do painel fotovoltaico. Com base na Equação 7 e nas medições de corrente/tensão realizadas no painel do drone, chegou-se ao seguinte circuito (Figura 29):

Figura 29 - Circuito modelo fotovoltaico no Proteus



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 3 mostra os valores empregados nesse modelo:

Tabela 3 - Especificação do modelo fotovoltaico no Proteus

Características	Valores
M_{PP}	120 W
V_{MP}	10,5 V
I_{MP}	11,4 A
I_{SC}	12 A
V_{OC}	11,9 V
Número de células	48
I_{PV}	12 A
R_{SH}	405,96 Ω
R_s	0,001 Ω

Fonte: Elaborada pelo autor.

Vários componentes são necessários para implementar o algoritmo MPPT, como sensores de tensão e corrente, uma placa embarcada, um conversor e um driver. A plataforma do Proteus já dispõe de todos esses componentes de hardware.

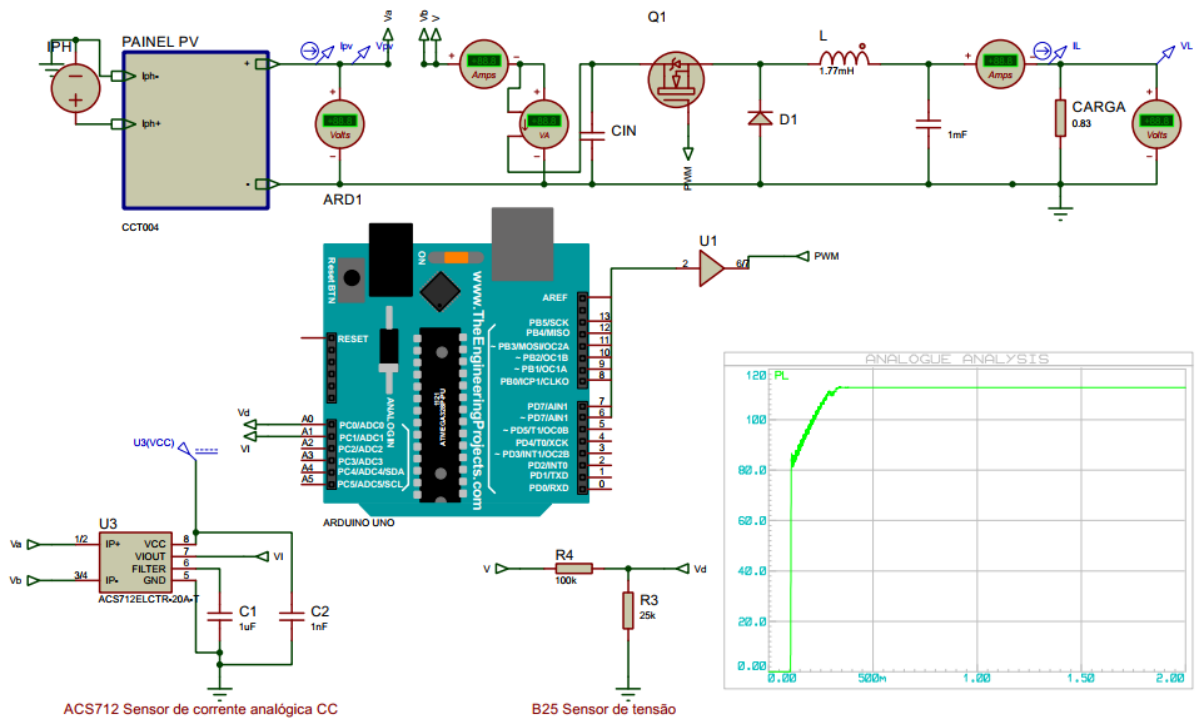
Microcontrolador embarcado: Foi empregado a placa Arduino UNO, que é baseada no microcontrolador ATmega328 de baixo custo.

Sensor de tensão: Para fazer a leitura da tensão é necessário reduzir seu range para os 5 V, que é o valor máximo que a entrada analógica do Arduino suporta. O sensor usado neste trabalho é o “Sensor de tensão B25”, que consiste de um circuito divisor de tensão com dois resistores.

Sensor de corrente: Para fazer a leitura da corrente foi utilizado o sensor de efeito hall, que detecta o campo magnético gerado pela passagem da corrente. O sensor utilizado foi o ACS712 de 20A.

Conversor: conforme apresentado na Figura 30, para possibilitar que a carga opere sempre próximo ao MPP, o conversor Buck é utilizado nessa pesquisa.

Figura 30 - Circuito MPPT com Arduino



Fonte: Elaborada pelo autor.

O conversor Buck opera pelas seguintes equações (BA et al., 2018):

$$V_{carga} = \alpha \cdot V_{painel} \quad (12)$$

$$L_{carga} = \frac{I_{painel}}{\alpha} \quad (13)$$

Onde o valor do capacitor pode ser encontrado através da equação:

$$C = \frac{(1-\alpha)V_L}{8\Delta V_L L f^2} \quad (14)$$

O valor do indutor:

$$L = \frac{(1-\alpha)R_L}{2f} \quad (15)$$

Os parâmetros do conversor Buck são selecionados como segue, $L = 1,77$ mH, $C = 1$ mF, $F = 1$ kHz e R da carga é $0,83 \Omega$. Deve ser mencionado que a chave usada no projeto do Buck é o Mosfet IRFP250N porque tem uma baixa resistência interna, igual a $0,075 \Omega$. Portanto, usando esta chave, a perda de energia é reduzida.

Conforme representado na Figura 30, por razões de clareza, o modelo do painel PV no Proteus é colocado em um “Subcircuito” e, em seguida, é ligado à carga por meio do conversor Buck. A placa embarcada (Arduino) mede a tensão e a corrente fotovoltaica usando sensores de tensão e corrente. Em seguida, o algoritmo MPPT implementado na placa embarcada usa esses dados para controlar o conversor buck por meio do driver, usando o ciclo de trabalho calculado para chegar ao MPP.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Teste de voo

Com a ligação e configuração da controladora de voo, foi levado o drone para um local aberto sem vento, para a realização do teste de voo. O horário escolhido para os testes foi de 11 às 13 horas por ser o momento que apresenta maior radiação solar, como apresentado por Velandia (2018).

Para evitar o capotamento do drone, a aceleração foi feita aos poucos até que fosse atingido potência suficiente para que o mesmo decolasse do chão. Foi observado que o drone acelerava seus motores até 30% do curso do canal do rádio, não possuindo potência suficiente para alçar voo, limitando-se apenas em descolar do chão (fazendo movimentos laterais).

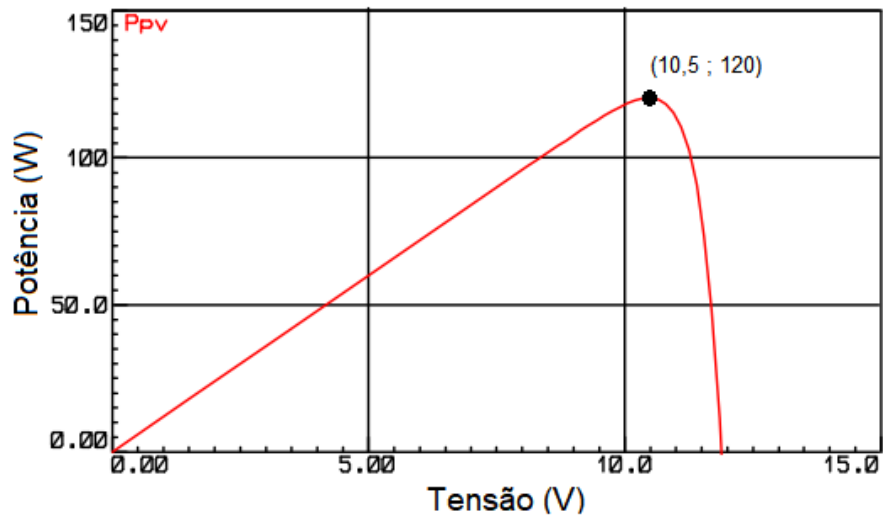
Segundo Shaheed et al. (2015), para que o drone possa realizar um voo, a relação de empuxo e peso precisa ser maior do que 1. Sabendo que a corrente máxima fornecida pelo painel é de aproximadamente 12 A, fica um pouco menos que 3 A para cada motor Brushless. De acordo com a Tabela 2, cada motor emax 2213 gera 310 g de empuxo para uma corrente de 3 A, ficando o empuxo total aproximadamente 1240 g, sendo que o peso total do drone é 1140 g. Porém, vale ressaltar que cada componente (receptor, controlador de voo e ESC) também consomem parte da potência gerada pelos painéis. Sendo assim, justifica o fato observado de que o drone por mais que descolasse do chão, não possuía potência suficiente para alçar voo.

Uma solução seria a substituição dos motores emax 2213 por modelos mais eficientes como é o caso do retimer 5010, que consegue gerar um empuxo de 610g para uma corrente de 3,2 A. Outra forma, seria a utilização de uma bateria para complementar a energia fornecida pelo painel, buscando um modelo que possibilite um maior aumento de propulsão do que peso.

5.2 Simulação no Proteus

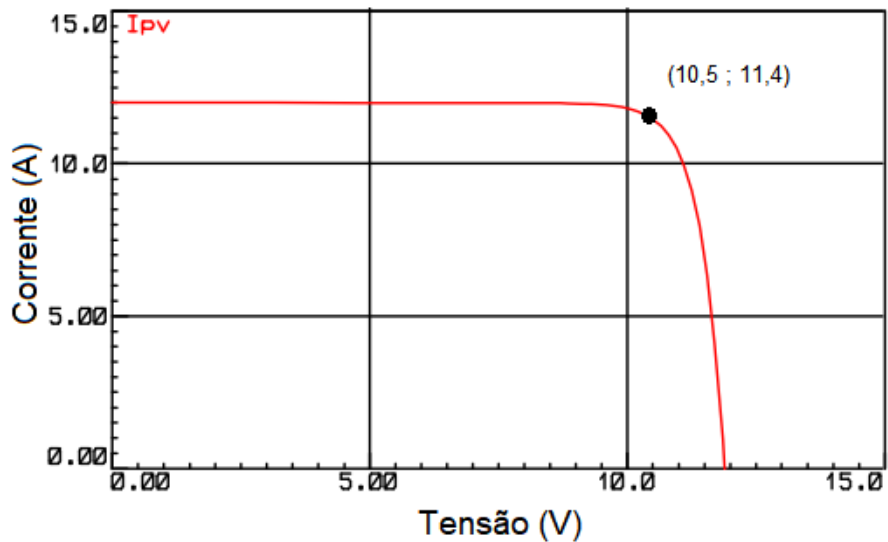
Através da simulação foi gerada as curva de P-V (Figura 31) e a curva I-V (Figura 32) para o modelo criado. O MPP foi destacado com uma potência de 120 W para uma tensão de 10,5 V.

Figura 31 - Curva P-V do modelo no Proteus



Fonte: Elaborada pelo autor.

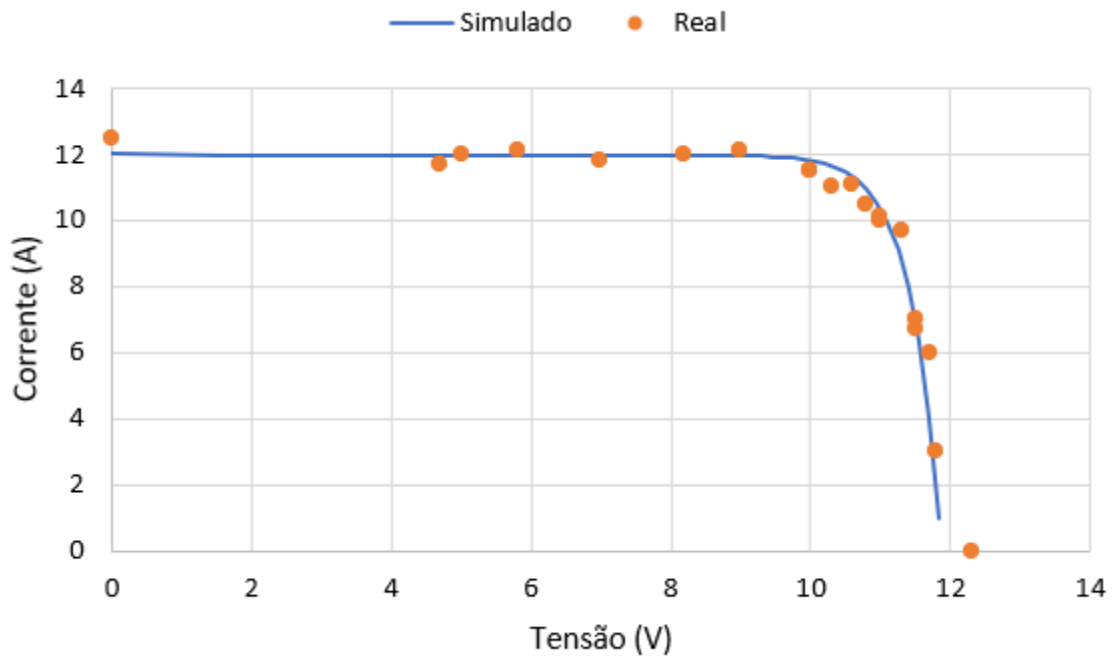
Figura 32 - Curva I-V do modelo no Proteus



Fonte: Elaborada pelo autor.

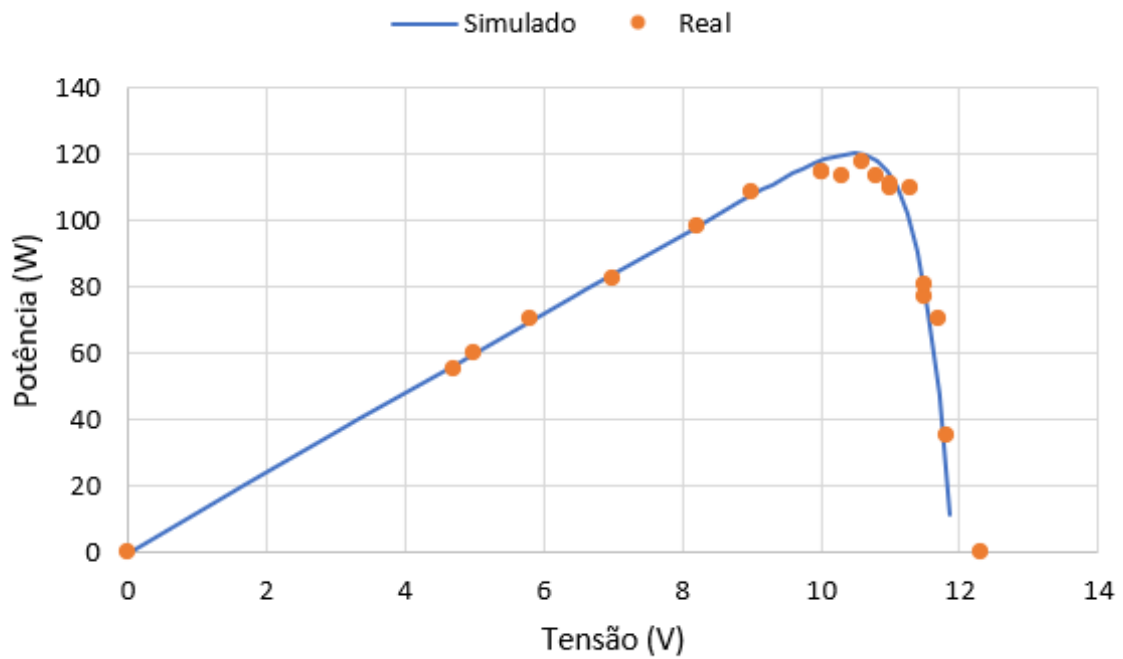
A fim de validar os valores obtidos, foi realizado medições de tensão e corrente utilizando dois multímetros no horário de 12h (período de maior radiação solar), para variadas condições de carga.

Figura 33 - Curva P-V do modelo no Proteus e valores medidos



Fonte: Elaborada pelo autor.

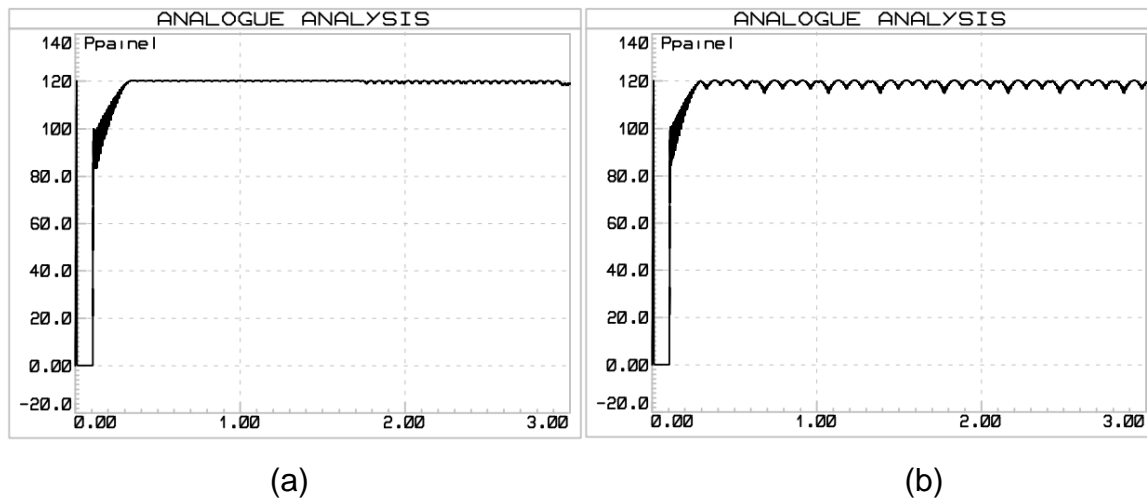
Figura 34 - Curva I-V de modelo no Proteus e valores medidos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi realizado a simulação comparando o desempenho dos algoritmos MPPT (Condutância Incremental e o Perturbe e Observe) partindo de um estado estacionário. Além disso, a transição de ambos os métodos é comparada para identificar qual método tem o menor tempo de resposta, sendo esse um fator fundamental para o bom funcionamento do drone.

Figura 35 - Curvas de potência no painel para o algoritmo INC (a) e P&O (b)

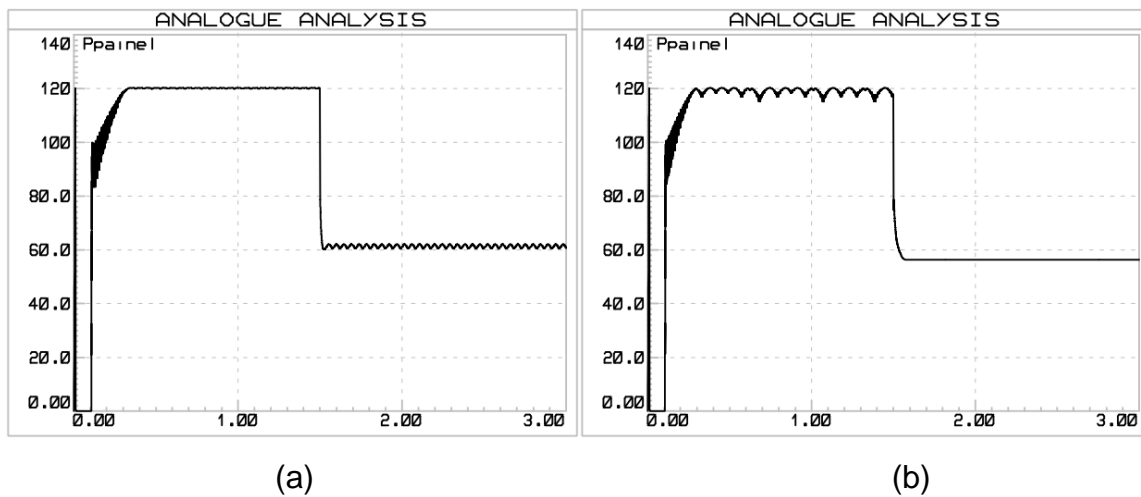


Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi observado que o método INC (Figura 35(a)) chegou a potência média de 119 W (eficiência de 99,2%) e o método P&O (Figura 35(b)) chegou a potência média de 118 W (eficiência de 98,3%). Em relação à resposta transitória, o método INC chegou à estabilização em 230 ms, contra 200 ms do P&O.

Para simular uma condição de variação na radiação (que é algo no qual o drone será submetido) foi feita a variação instantânea de 1000 W/m^2 para 600 W/m^2 em $t = 1,5 \text{ s}$. A Figura 36(a) apresenta o resultado da simulação do algoritmo Condutância Incremental e a Figura 36(b) apresenta o resultado da simulação do algoritmo Perturbe e Observe.

Figura 36 - Curvas de potência no painel com variação de radiação para o algoritmo INC (a) e P&O (b)

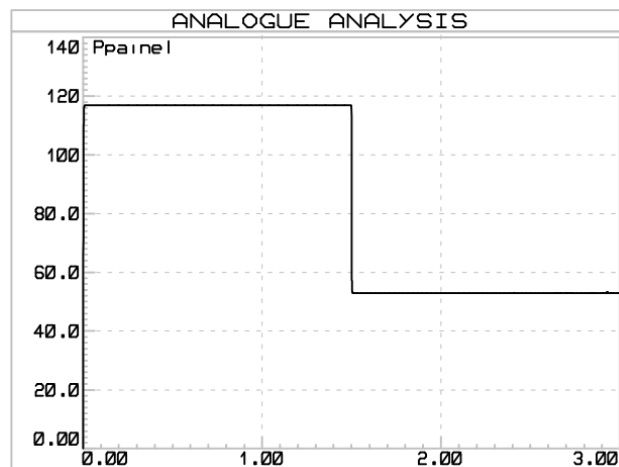


Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme apresentado, a resposta transitória é rápida em ambos os métodos. O valor médio da potência é 62 W para o INC e 56,2 W para o P&O.

Para mensurar a o ganho de potência fornecido pelos métodos MPPT, foi gerado o gráfico da potência no painel sem o uso do conversor buck (Figura 37).

Figura 37 - Curvas de potência no painel sem o MPPT



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que para uma radiação de 1000 W/m^2 a potência média é de 117 W e 52,9 W para 600 W/m^2 . A Tabela 4 faz o comparativo entre os métodos e esse resultado sem o rastreamento.

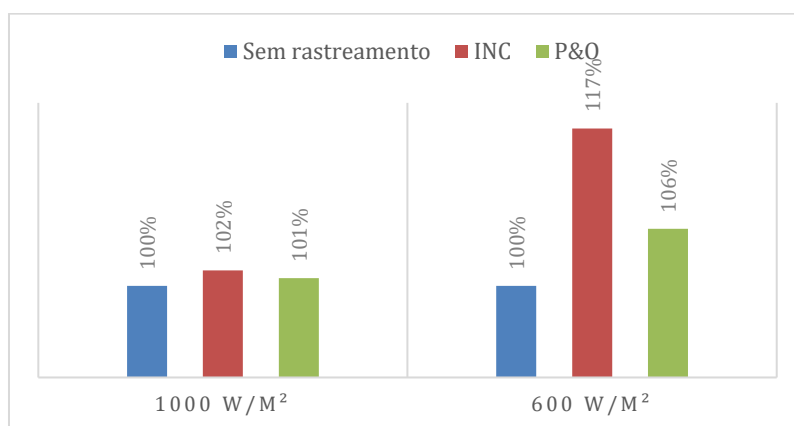
Tabela 4 - Comparativo entre potências

	Sem rastreamento	INC	P&O
Potência à 1000 W/m ²	117 W	119 W	118 W
Potência à 600 W/m ²	52,9 W	62 W	56,2 W

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para melhor interpretação dos dados, a Figura 38 faz a relação de ganho de potência dos métodos MPPT em relação ao circuito sem rastreamento.

Figura 38 – Relação de ganho de potência na carga



Fonte: Elaborada pelo autor.

O ganho de potência é muito superior para a radiação de 600W/m². Isso se dá por conta do ponto em que a carga se encontra na curva de potência. Caso a carga opere próximo ao ponto MPP, o método irá gerar um pequeno ganho quando comparado a potência sem o rastreamento. Em outras regiões da curva, o MPPT irá fazer o rastreamento buscando sempre operar próximo ao MPP, gerando ganhos maiores de potência. Só esse fato, já justifica o método, sendo que o normal é que o painel opere com carga e radiação variável.

6 CONCLUSÃO

O objetivo da pesquisa foi alcançado com o projeto e simulação do circuito MPPT, demonstrando um ganho considerável de potência com a utilização do mesmo. O teste de voo mostrou que o drone é capaz de decolar, porém não possui propulsão suficiente para ter um voo contínuo. A principal razão, se dá a baixa relação impulso e peso que impede o drone de se manter no ar.

Com a simulação, foi possível analisar o ganho de potência que os métodos MPPT fornecem ao drone, principalmente para a irradiação de 600 W/m^2 . Esse fato, confirma a eficiência dos métodos, que permitem maior ganho de potência, quanto mais distantes estiverem do MPP. Tais ganhos são indispensáveis para o funcionamento do drone, bem como em qualquer outra aplicação, onde se busca sempre a melhor eficiência de um sistema. O método INC se mostrou bem mais eficiente, conseguindo um maior aproveitamento da potência que o método P&O. Embora o INC tenha estabilizado com um tempo maior, a diferença é desprezível quando comparado à maior eficiência obtida com o mesmo. Isso só confirma o que é descrito na literatura sobre a comparação dos dois métodos.

Como sugestões para futuras pesquisas, com a finalidade de se conseguir o voo pleno do drone, seria necessário substituir os motores por modelos com maior empuxo. Um melhor encapsulamento para as células PV já que a estrutura do painel é bastante frágil. A montagem do MPPT no circuito de potência do drone para validar os resultados da simulação e fornecer um maior aproveitamento da energia gerada pelo painel. O estudo e aplicação de outros métodos MPPT, por se tratar de uma área bastante estudada na atualidade e que produz bastante publicação.

REFERÊNCIAS

ABBE, G.; SMITH, H.. Technological development trends in Solar-powered Aircraft Systems. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 60, p.770-783, jul. 2016.

ALVI, O. R. Development of Solar-Powered Aircraft for Multipurpose Application. **51st Aiaa/asme/asce/ahs/asc Structures, Structural Dynamics, And Materials Conference 18th Aiaa/asme/ahs Adaptive Structures Conference 12th**, [s.l.], p.1-16, 12 abr. 2010.

BA, A.; EHSSEIN, C. O.; MAHMOUD, M. E.; HAMDOUN, O.; ELHASSEN, A.. Comparative Study of Different DC/DC Power Converter for Optimal PV System Using MPPT (P&O) Method. **Applied Solar Energy**, [S.L.], v. 54, n. 4, p. 235-245, jul. 2018.

BALBINO, A. **Estudo e Desenvolvimento de Dispositivo de Processamento de Energia com Duplo Estágio de Conversão Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Isolados**. 2017. 114 f. Monografia. Pró-reitoria de ensino, pesquisa e pós-graduação campus de Erechim. Departamento de engenharias e ciência da computação curso de engenharia elétrica, Erechim, 2017.

BHATNAGAR, P; NEMA, R. K.. Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 23, p.224-241, jul. 2013.

BIALASIEWICZ, J. T.. Renewable Energy Systems With Photovoltaic Power Generators: Operation and Modeling. **Ieee Transactions On Industrial Electronics**, [s.l.], v. 55, n. 7, p.2752-2758, jul. 2008.

BOUCHER, R. J. History of Solar Flight. **In Proc. of the 20th Joint Propulsion Conference**, Cincinnati, Ohio, USA, 1984.

BOULAID, M. et al. Comparative performance assessment of mono crystalline, multi crystalline, and amorphous silicon grid-connected photovoltaic systems under actual climatic conditions of Agadir, Morocco. **International Journal Of Green Energy**, [s.l.], v. 14, n. 14, p. 1182-1191, 2 out. 2017.

BRITO, S. S. Centro de referência para energia solar e eólica. **CRESESB Informe-Rio de Janeiro**, v. 12, n. 13, p. 3, 2008.

CHAIBI, Y., SALHI, M., EL-JOUNI, A., & ESSADKI, A. A new method to extract the equivalent circuit parameters of a photovoltaic panel. **Solar Energy**, 163, 376–386. 2018.

CHEN, H. et al. Enhancement of power conversion efficiency in GaAs solar cells with dual-layer quantum dots using flexible PDMS film. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [s.l.], v. 104, p. 92-96, set. 2012.

D'SOUZA, N. S., LOPES, L. A. C., LIU, X. Comparative study of variable size perturbation and observation maximum power point trackers for PV systems, *Electric Power Systems Research*. Elsevier, 80(3), pp. 296–305, 2010.

DABRA, V.; PALIWAL, K. K.; SHARMA, P.; KUMAR, N. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study. **Protection And Control Of Modern Power Systems**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1-10, 8 fev. 2017.

FAZELPOUR, Farivar et al. Considerable parameters of using PV cells for solar-powered aircrafts. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 22, p.81-91, jun. 2013.

GAO, Xian-zhong et al. Reviews of methods to extract and store energy for solar-powered aircraft. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 44, p. 96-108, abr. 2015.

GREEN, M. et al. Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [s.l.], v. 65, n. 1-4, p.9-16, jan. 2001.

HAQUE, A; ZAHEERUDDIN. A fast and reliable perturb and observe maximum power point tracker for solar PV system. **International Journal Of System Assurance Engineering And Management**, [s.l.], v. 8, n. 2, p.773-787, 4 ago. 2016.

KAZIMIERCZUK, M. K.. Analysis of buck/boost zero-current-switching resonant DC/DC convertor. **Iee Proceedings B Electric Power Applications**, [s.l.], v. 136, n. 3, p.127-135, 1989.

KIM, Mu-joong; MIN, Kwan Hong; PARK, Sungeun; SONG, Hee-eun; LEE, Jeong In; JEONG, Kyung Taek; PARK, Jin-seong; KANG, Min Gu. Study on efficiency improvement of multi-crystalline silicon solar cell by removing by-product and plasma induced damage generated during reactive ion etching. **Current Applied Physics**, [s.l.], v. 20, n. 4, p. 519-524, abr. 2020.

LEE, Taesoo D.; EBONG, Abasifreke U.. A review of thin film solar cell technologies and challenges. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 70, p. 1286-1297, abr. 2017.

LOPES, G.; FRANCO, R.A.P.; VIEIRA, F.H.T.. Algoritmo de Seguimento do Ponto de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos considerando Minimização de Erro e Derivada da Potência. **Scielo Analytics**, São Carlos, v. 21, n. 1, abr. 2020.

MA, D. et al. Optimal Level Turn of Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicle Flying in Atmosphere. **Journal Of Guidance, Control, And Dynamics**, [s.l.], v. 33, n. 5, p.1347-1356, set. 2010.

MATHEW, X. et al. CdTe/CdS solar cells on flexible substrates. **Solar Energy**, [s.l.], v. 77, n. 6, p. 831-838, dez. 2004.

MCEVOY, A.; MARKVART, T.; CASTANER, L. **Practical Handbook of Photovoltaics**: fundamentals and applications. 2. ed. Southampton: Academic Press, 2011. 1268 p.

MORIWAKI, K. et al., Shigeru. Monolithically integrated flexible Cu(In,Ga)Se₂ solar cells and submodules using newly developed structure metal foil substrate with a dielectric layer. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [s.l.], v. 112, p. 106-111, maio 2013.

MOTAHHIR, S.; CHALH, A.; GHZIZAL, Abdelaziz E.; DEROUICH, A. Development of a low-cost PV system using an improved INC algorithm and a PV panel Proteus model. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 204, p. 355-365, dez. 2018.

NOTH, A; CORKE, P; SIEGWART, Roland. **Design of Solar Powered Airplanes for Continous Flight**. 2008. 197 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doctor Of Technical Sciences, Eth ZÜRICH, Zürich, 2008.

PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 15, n. 3, p.1625-1636, abr. 2011.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel – Cresesb, 2014. 530 p.

RAPINETT, A. **Zephyr: A High Altitude Long Endurance Unmanned Air Vehicle**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Physics, Department Of Physics, University Of Surrey, Surrey, 2009.

RIBEIRO, D. **Como construir um drone**. 2016. Disponível em: <http://www.outros.net/2016/05/25/como-construir-um-drone-quadrilatero-do-zero/2/>. Acesso em: 01 fev. 2020.

SALMAN, S.; AI, X.; WU, Z. Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system. **Protection And Control Of Modern Power Systems**, [S.L.], v. 3, n. 1 , 17 ago. 2018

SCHEIDT, P. Cartilha educativa sobre eletricidade solar. Instituto para o desenvolvimento de energias alternativas na América Latina, **Eletricidade solar**. BRASIL. 2007.

SEGUEL, J. I. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. 2009. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SHAHEED, M. H., ABIDALI, A., AHMED, J., AHMED, S., BURBA, I., FANI, P. J., ... MUNJIZA, A. Flying by the Sun only: The Solarcopter prototype. **Aerospace Science and Technology**, 45, 209–214, 2015.

SUNDARAM, Senthilarasu; SHANKS, Katie; UPADHYAYA, Hari. Thin Film Photovoltaics. **A Comprehensive Guide To Solar Energy Systems**, [s.l.], p. 361-370, 2018.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. The history of solar. **energy Efficiency and Renewable Energy**, v. 93, p. 1461–1470, 2011.

VELANDIA, W. F. **Dimensionamento e instalação de um sistema solar fotovoltaico em um veículo aéreo não tripulado (vant) do tipo multirotor alimentado somente por energia fotovoltaica**. 2018. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

VELASCO, J. Proyecto Drone. **Ciência Rural**, v. 2013, n. 3, p. 1–27, 2014.

VILLALVA, M. G. **Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. 2017. 268 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010

WANG, Z. et al., Significant influence of TiO₂ photoelectrode morphology on the energy conversion efficiency of N719 dye-sensitized solar cell. **Coordination Chemistry Reviews**, [s.l.], v. 248, n. 13-14, p. 1381-1389, jul. 2004.

ZAKZOUK, N. E., ABDELSALAM, A. K., HELAL, A. A., & WILLIAMS, B. W. Modified variable-step incremental conductance maximum power point tracking technique for photovoltaic systems. IECON 2013 - **39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. 2013.

ZHENG, E.; XIONG, J.; LUO, J. Second order sliding mode control for a quadrotor UAV. **Isa Transactions**, [s.l.], v. 53, n. 4, p. 1350-1356, jul. 2014.

ANEXO A – CÓDIGO DO ALGORITMO INC

```

float sensorValue1 = 0;

float sensorValue2 = 0;

float voltageValue = 0;

float currentValue = 0;

float Power_now = 0, Power_anc=0, Current_anc =0,Voltage_anc=0, deltaI=0, deltaV=0 ;

float delta = 3;

float pwm = 200;

void setup()
{
  pinMode(6, OUTPUT);
}

void loop()
{
  sensorValue1 = analogRead(A0);

  sensorValue2 = analogRead(A1);

  voltageValue= (sensorValue1 * 5.0 /1023.0) *5;

  currentValue= ((sensorValue2*0.0317)-11.87);

  Power_now = voltageValue * currentValue;

  deltaI= currentValue-Current_anc;

  deltaV= voltageValue-Voltage_anc;

  if(deltaV==0)
  {
    if(deltaI==0)
      { // não faz nada
      }
    else
      { if(deltaI>0)
      {
        pwm=pwm+delta;
      }
      else
      {
        pwm=pwm-delta;
      }
      }
  }
  else
  {
    if((deltaI/deltaV)==(-currentValue/voltageValue))

      { // não faz nada
      }
  }
}

```

```
Else
{ if((voltageValue*delta)>(-currentValue*deltaV))
  {
    pwm=pwm+delta;
  }
  else
  {
    pwm=pwm-delta;
  }
}
Voltage_anc= voltageValue;
Current_anc= currentValue;
Power_anc=Power_now;
if(pwm > 255)
  pwm=255;
if (pwm < 20)
  pwm=20;
analogWrite(6, pwm);
}
```

ANEXO B – CÓDIGO DO ALGORITMO P&O

```

float sensorValor1 = 0;

float sensorValor2 = 0;

float voltageValor = 0;

float currentValor = 0;

float Power_now = 0, Power_anc = 0, current_anc = 0;

float delta = 3;

float pwm = 200;

void setup()
{
  pinMode(6, OUTPUT);
}

void loop()
{
  sensorValor1 = analogRead(A0);

  sensorValor2 = analogRead(A1);

  voltageValor = (sensorValor1 * 5.0 / 1023.0) * 5;

  currentValor = ((sensorValor2 * 0.0317) - 11.87);

  //currentValor = (sensorValor2 * 5.0 / 1023.0);

  Power_now = voltageValor * currentValor;

  if (Power_now > Power_anc)

  { if (currentValor > current_anc)

      pwm = pwm + delta;
    else
      pwm = pwm - delta;
  }
  else
  {
    if (currentValor > current_anc)
      pwm = pwm - delta;
    else
      pwm = pwm + delta;
  }
  Power_anc = Power_now;
  current_anc = currentValor;
  if (pwm < 20)
    pwm = 20;
  if (pwm > 255)
    pwm = 255;

  analogWrite(6, pwm);
}

```