

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**DANYELLE SOUZA DA SILVA**

**ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS PARA  
AMPLIAÇÃO DE AUTONOMIA DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS  
(RPAs) DE ASA FIXA**

**MEDIANEIRA**

**2025**

**DANYELLE SOUZA DA SILVA**

**ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS PARA  
AMPLIAÇÃO DE AUTONOMIA DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS  
(RPAs) DE ASA FIXA**

**Study of photovoltaic arrangement configurations for expanding the autonomy  
of fixed wing remotely piloted aircraft (rpas)**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Alberto Noboru Miyadaira

Coorientador: Ricardo Souza Senandes

**MEDIANEIRA**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**DANYELLE SOUZA DA SILVA**

**ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS PARA  
AMPLIAÇÃO DE AUTONOMIA DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS  
(RPAs) DE ASA FIXA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 17/junho/2025

---

Alberto Noboru Miyadaira  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Ricardo Souza Senandes  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Filipe Marangoni  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

José Airton Azevedo dos Santos  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**MEDIANEIRA  
2025**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador, Professor Alberto Noboru Miyadaira, por todo o suporte e orientação dedicados ao longo deste trabalho. Um agradecimento especial se estende ao meu coorientador, Professor Ricardo Souza Senandes, cuja instrução e empenho foram inestimáveis para a construção deste TCC, guiando-me a cada etapa do processo.

Minha gratidão se estende a Daniel Marcos Dal Pozzo, por construir com tanto cuidado a base para o teste de bancada do motor; a Claudio Loenes Bazzi, pela ajuda essencial na aquisição de alguns materiais para o projeto, e ao Professor Yuri, por disponibilizar seu tempo para auxiliar nos testes de irradiação solar e esclarecer dúvidas cruciais sobre o funcionamento das células fotovoltaicas. Agradeço também à minha querida amiga Marina, por sua valiosa ajuda nos testes práticos.

À minha mãe e aos meus irmãos, minha eterna gratidão pelo apoio incondicional, incentivo e amor que sempre me dedicaram.

Por fim, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), sou imensamente grata por ter transformado minha realidade, proporcionando-me a oportunidade de realizar um grande sonho. Guardo com carinho todo o conhecimento adquirido, as experiências vividas, e o crescimento pessoal e acadêmico, além das amizades que essa jornada me proporcionou.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar o impacto de diferentes arranjos de células fotovoltaicas na autonomia de um aeromodelo de asa fixa. A motivação principal foi a limitação do tempo de voo em RPAs (Aeronaves Remotamente Pilotadas) alimentadas exclusivamente por baterias, especialmente em missões prolongadas. Para isso, foram realizados testes elétricos em bancada, sob diferentes condições de irradiância solar, visando verificar o comportamento dos arranjos quanto à geração de corrente e tensão. Durante os experimentos, observou-se que arranjos com células conectadas apenas em série já forneciam corrente suficiente ao sistema, dispensando a necessidade de ligações em paralelo. Também foi identificado que configurações com menos de 16 células não atingiam a tensão mínima exigida para o acionamento do controlador de carga MPPT. Entre os arranjos testados, o de 32 células em série apresentou o melhor desempenho energético. A fim de representar o consumo nas fases do voo subida, cruzeiro e descida foi desenvolvido um código para simular a demanda de potência do motor. Complementarmente, implementou-se uma simulação computacional no MATLAB, utilizando dados reais de irradiância, com o objetivo de comparar os resultados obtidos com os testes práticos. Os dados confirmaram que, com o correto dimensionamento dos arranjos fotovoltaicos, é possível ampliar a autonomia do aeromodelo por meio da geração embarcada de energia fotovoltaico.

**Palavras-chave:** aeronaves; células solares; autonomia; baterias elétricas.

## ABSTRACT

This study aimed to analyze the impact of different photovoltaic cell arrangements on the autonomy of a fixed-wing model aircraft. The main motivation was the limitation of flight time in RPAs (Remotely Piloted Aircraft) powered exclusively by batteries, especially in prolonged missions. For this purpose, electrical tests were performed on a bench, under different solar irradiation conditions, in order to verify the behavior of the arrangements regarding current and voltage generation. During the experiments, it was observed that arrangements with cells connected only in series already provided sufficient current to the system, eliminating the need for parallel connections. It was also identified that configurations with less than 16 cells did not reach the minimum voltage required to activate the MPPT charge controller. Among the arrangements tested, the one with 32 cells in series presented the best energy performance. In order to represent the consumption in the climb, cruise and descent phases of the flight, a code was developed to simulate the engine power demand. Additionally, a computer simulation was implemented in MATLAB, using real irradiance data, with the aim of comparing the results obtained with practical tests. The data confirmed that, with the correct dimensioning of the photovoltaic arrays, it is possible to increase the autonomy of the model aircraft through onboard generation of photovoltaic energy.

**Keywords:** airships; solar cells; autonomy; electric battery.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de componentes de simulação do voo da RPA. ....	7
Figura 2 - Modelo proposto da RPA com construção em Depron PR-SOLARTEC..	13
Figura 3 - Motor Turnigy D3548-4 Brushless utilizado nas simulações.....	15
Figura 4 - Controlador Eletrônico de Velocidade de 80A. ....	15
Figura 5 - Células Fotovoltaicas monocristalina da SunPower® C60. ....	15
Figura 6 - Controlador de Carga MPPT PowerMr. ....	16
Figura 7 - Bateria Li-Po 4S de 5200 mAh conectada ao BMS. ....	16
Figura 8 - Microcontrolador Arduino UNO utilizado para simular os estágios de voo. ....	17
Figura 9 - Controladora de voo MATEKSYS® F405-WING. ....	17
Figura 10 - Medidor de Energia Ultravioleta Solar Portátil Radiometer LX.....	19
Figura 11 - Interface inicial do software PVsyst 8.0.12.....	21
Figura 12 - Interface "Base de Dados" do PVsyst. ....	22
Figura 13 - Interface para adicionar uma nova localização. ....	22
Figura 14 - Dados do modulo SunPower C60 adaptado. ....	23
Figura 15 - Curvas corrente por tensão do Painel SunPower. ....	24
Figura 16 - Gráfico de Temperatura e Irradiação solar para o dia 28 de Abril de 2025. ....	27
Figura 17 - Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica. ....	28
Figura 18 - Demonstração de um circuito interno em serie de células fotovoltaicas.....	28
Figura 19 - Gráfico da Voc e Isc.....	29
Figura 20 - Imagens do sistema fotovoltaico para medições da Isc e Voc para o Teste 2. ....	30
Figura 21 - Medições - Isc e Voc teste 3. ....	31
Figura 22 - Gráfico das Medições de Isc e Voc.....	32
Figura 23 - Valores teóricos do Datasheet. ....	33
Figura 24 - Curva I-V das células fotovoltaicas. ....	33
Figura 25 - Curva característica corrente-tensão (I-V). ....	34
Figura 26 - A curva característica potência-tensão (P-V).....	34
Figura 27 - Funcionamento do Controlador de carga.....	35
Figura 28 - Fluxograma o funcionamento do Controlador de Carga. ....	36
Figura 29 - Suporte para Teste de Bancada. ....	38
Figura 30 - Primeiro teste ambiente fechado. ....	38
Figura 31 - Medições de irradiância solar, corrente e tensão durante a simulação em ambiente fechado.....	39
Figura 32 - Corrente fornecida a bateria 3S. ....	39
Figura 33 - Inicialização do ESC e modo subida do motor.....	41
Figura 34 - Estabilização subida motor em 80%. ....	42

Figura 35 - Modo Cruzeiro 50%. .....	42
Figura 36 - Modo descida 30%. .....	43
Figura 37 - Foto tirada as 10h do dia da simulação 2. ....	44
Figura 38 - Corrente Fornecida pelo painel fotovoltaico.....	45
Figura 39 - Medições de Corrente e tensão do painel.....	45
Figura 40 - Medição da corrente fornecida pelo painel. ....	46
Figura 41 - Gráfico de Irradiância solar.....	46
Figura 42 - Gráfico de temperatura.....	47
Figura 43 - Acionamento do ESC e modo subida do motor. ....	48
Figura 44 - Modo Cruzeiro. ....	48
Figura 45 - Modo cruzeiro bateria baixa.....	49
Figura 46 - Modo descida.....	49
Figura 47 - Gráfico representando variações de corrente e tensão e potência.....	51
Figura 48 - Foto tirada no dia do teste 2. ....	52
Figura 49 - Irradiância, Corrente FV e Tensão da Bateria em Condição Simulada com Carga de 3A. ....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes e Peças necessárias para a montagem da Simulação da RPA PR-SOLARTEC. ....	24
Tabela 2 – Dados de Temperatura e Irradiação Solar do dia 28 de abril. ....	26
Tabela 3 - (Isc) e (Voc) das strings Fotovoltaicos no Teste 1. ....	27
Tabela 4 - Isc e Voc dos string Fotovoltaicos teste 2. ....	30
Tabela 5 - Isc e Voc das strings Fotovoltaicos teste 3. ....	31
Tabela 6 - Dados da Simulação de voo 1. ....	43
Tabela 7 - Dados da Simulação de voo 2. ....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
BLDC	Brushless Direct Current
CBA	Código Brasileiro de Aeronáutica
CdTe	Telureto de Cádmiio
CIGS	<i>Copper Indium Gallium Selenide Solar Cells</i>
c-Si	Silício Cristalino
Cu	Cobre
DC	<i>Direct Current</i>
ESC	Electronic Speed Controller
GCS	<i>Ground Control Station</i>
GPS	Global Positioning System
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IMM	<i>Inverted Metamorphic Multi-junction</i>
InGa	Índio Gálio
Isc	Corrente de Circuito Aberto
Li-Po	Polímero de Lítio
mAh	Miliampère-hora
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
m-Si	Silício Monocristalino
NRL	Naval Research Laboratory
PR	Paraná
p-Si	Silício Policristalino
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RPAs	Aeronaves Remotamente Pilotadas
RPAS	Aeronaves Remotamente Pilotadas
Se <sup>2</sup>	Íon Seleneto
Si	Silício
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados
Voc	Tensão de Circuito Aberto
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Componentes Integrantes Da Aeronave .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>Energia Solar Aplicada Em RPAs .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Controladores De Carga .....</b>	<b>10</b>
<b>2.4</b>	<b>Células Fotovoltaicas .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>AERONAVE PROPOSTA PR-SOLARTEC .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Sistema de Energia da PR-SOLARTEC .....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>MÉTODOLOGIA .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Métodos.....</b>	<b>20</b>
<b>4.2</b>	<b>Recursos Materiais e Financeiros .....</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>TESTES E RESULTADOS .....</b>	<b>26</b>
<b>5.1</b>	<b>Configurações do controlador de carga .....</b>	<b>35</b>
<b>5.2</b>	<b>Simulação de Voo 1 .....</b>	<b>37</b>
<b>5.3</b>	<b>Simulação de Voo 2 .....</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones, consolidaram-se como uma solução tecnológica essencial em uma ampla gama de aplicações. Desde atividades simples, como o monitoramento agrícola e inspeções urbanas, até operações mais complexas, como a vigilância de áreas de desmatamento e o levantamento de grandes estruturas, esses dispositivos demonstraram versatilidade e eficiência em diferentes setores.

Inicialmente desenvolvidos para fins militares e de reconhecimento, os drones evoluíram significativamente, incorporando tecnologias que os tornaram mais precisos, seguros e aptos a operar em ambientes desafiadores. Uma das principais vantagens observadas foi a ausência de tripulação a bordo, o que permitiu a utilização em áreas de difícil acesso ou com elevado risco, sem expor operadores humanos a situações perigosas.

Entretanto, mesmo com os avanços tecnológicos, a limitação da autonomia de voo, imposta pela capacidade das baterias, permaneceu como um dos principais desafios operacionais. Essa limitação mostrou-se especialmente crítica em missões prolongadas ou em locais com infraestrutura restrita para recarga. Diante disso, a utilização de fontes de energia renovável, como a energia fotovoltaico, surgiu como uma alternativa promissora para ampliar a autonomia e eficiência desses sistemas.

Neste contexto, a integração de painéis fotovoltaicos a drones de asa fixa foi investigada por suas vantagens em aplicações que exigem longos períodos de operação, como monitoramento ambiental, vigilância de infraestruturas e missões em áreas remotas. A possibilidade de recarregar as baterias durante o voo contribuiu para ampliar a autonomia, reduzir interrupções e promover uma solução mais sustentável em termos energéticos.

Este trabalho teve como objetivo analisar a configuração mais adequada de painéis fotovoltaicos para equipar um aeromodelo de asa fixa, com a finalidade de ampliar sua autonomia e reduzir a necessidade de recargas externas ao longo do dia. Para isso, foi desenvolvido um sistema de bancada que simula as diferentes fases de voo, integrando painéis fotovoltaico, bateria e motor. A partir dessa estrutura, foram realizados testes de desempenho e consumo energético, com o intuito de verificar se

o arranjo de painéis fotovoltaico é capaz de sustentar o funcionamento do sistema, mantendo a carga da bateria durante sua operação contínua.

## **1.1 Justificativa**

A escolha do tema deste Trabalho de Conclusão de Curso baseou-se na crescente demanda por sistemas aéreos não tripulados mais sustentáveis e com maior autonomia de voo, especialmente em aplicações como agricultura de precisão, monitoramento ambiental e operações de vigilância em áreas remotas. A utilização de aeronaves de asa fixa mostrou-se vantajosa pela sua eficiência aerodinâmica, baixo consumo de energia em voo e capacidade de cobrir grandes distâncias, sendo um modelo adequado para estudos de desempenho energético.

Entretanto, uma das principais limitações identificadas nesses sistemas foi a autonomia reduzida, decorrente da dependência de baterias com capacidade limitada. Diante disso, a integração de células fotovoltaicas ao sistema surgiu como uma alternativa viável para ampliar o tempo de voo e reduzir a necessidade de recarga frequente. A proposta do trabalho buscou explorar diferentes configurações de ligação das células fotovoltaicas, analisando como cada arranjo influencia na geração de energia e no funcionamento do sistema de carregamento.

A relevância do estudo justificou-se pela possibilidade de identificar qual arranjo de células fotovoltaicas que melhor atenda à demanda energética de uma RPA sem comprometer sua estrutura ou desempenho, além de promover soluções mais sustentáveis no uso da tecnologia embarcada. Embora o aeromodelo proposto não tenha sido construído, os testes práticos e simulações em bancada permitiram avaliar com consistência o funcionamento do sistema de energia e sua viabilidade em voo.

## **1.2 Objetivo**

Este estudo teve como objetivo analisar, por meio de testes experimentais e simulações em bancada, o potencial de um sistema fotovoltaico em complementar o fornecimento de energia elétrica de uma aeronave remotamente pilotada de asa fixa, com foco na ampliação de sua autonomia.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Identificar, por meio de testes práticos, o número mínimo de células fotovoltaicas necessário para garantir o funcionamento básico do sistema embarcado.
- Analisar arranjos de células capazes de proporcionar autossuficiência energética durante o voo simulado.
- Comparar o desempenho elétrico proporcionada por diferentes configurações de ligação das células fotovoltaicas.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Antes de explorarmos a história dessas aeronaves, é fundamental entender o que eles realmente são, drone é uma palavra de origem inglesa e sua tradução literal significa “zangão”, devido ao seu zumbido ao voar (CALIXTO, 2024).

A sua história é marcada por uma evolução constante, com raízes que remontam ao século XIX. Em 17 de março de 1849, o jornal *Scientific American* publicou a primeira notícia sobre o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs). A publicação relata que, em 22 de agosto de 1849, os austríacos planejavam um ataque a Veneza, utilizando cinco balões com cinco bombas, interligados por um fio de cobre (ALFARO, 2015).

Desde então os estudos sobre aeronaves remotamente pilotadas (RPA), cresceu com intenção de uso militar, novos modelos foram desenvolvidos com aerodinâmicas distintas para uso de missões e criados cada um para uma aplicação específica.

Segundo Silva (2018), é importante destacar que, segundo a legislação, esses equipamentos são classificados como aeronaves, mesmo na ausência de um piloto a bordo. A definição contida no artigo 106 do Código Brasileiro de Aeronáutica (CBA), estabelecido pela Lei nº 7.565/1986, sustenta a interpretação ao afirmar é considerado aeronave toda, aparelho manobrável em vôo, que possa sustentar-se e circular no espaço aéreo, mediante reações aerodinâmicas, apto a transportar pessoas ou coisas.

Diante da questão apresentada e conforme as normas estabelecidas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), a terminologia correta no Brasil para essas aeronaves não tripuladas utilizadas para fins distintos do lazer é a Aeronave Remotamente Pilotada (RPA).

Por essa razão, este estudo utiliza a sigla RPA para se referir a esse tipo de aeronave, controlada remotamente por um piloto que não está a bordo, utilizando uma interface externa, como computador, simulador, dispositivo digital ou controle remoto, e que, neste contexto, tem uma finalidade de uso diferente da recreativa.

Entre os drones que se encaixam nesse contexto temos os multi-rotor. De acordo com Medeiros (2007), os multi-rotor, como o nome remete, possuem múltiplos rotores, geralmente quatro ou mais. São amplamente utilizados em

contextos comerciais e recreativos com diversas aplicações na área agrícola devido à facilidade de pilotagem, estabilidade e capacidade de carga. Isso facilita a captura de imagens e dados precisos, mas possuem limitações de capacidade de carga e autonomia de voo, que costumam ser inferiores a 30 minutos.

Segundo Bahabry et al. (2019), eles são fundamentais em cidades inteligentes, desempenhando funções como entregas, vigilância e coleta de dados, devido à sua mobilidade tridimensional, baixo custo e capacidade de operar em ambientes urbanos complexos. Sua habilidade de pairar e navegar em altitudes variadas facilita o desvio de obstáculos garantindo segurança e eficiência.

Já os drones de rotor único, conforme Medeiros (2007), possuem asa rotativa, semelhantes aos helicópteros, possuem lâminas rotativas que permitem decolagem e pouso vertical. Eles são altamente manobráveis e podem ser emparelhados, o que os torna adequados para missões que exigem observação específica em áreas específicas. Embora possam operar em espaços menores, sua autonomia de voo e capacidade de carga são limitadas em comparação aos drones de asa fixa.

Segundo Hasan et al. (2020), o conceito de drones de asa fixa são aeronaves não tripuladas projetadas para voar de forma eficiente em longas distâncias. Diferentemente das aeronaves do tipo multi-rotor ou uni-rotor, que dependem de hélices verticais para decolagem e pouso, os de asas fixas são iguais a aviões e usam a asa para gerar sustentação, permitindo um voo mais estável e eficiente em termos de consumo de energia.

Eles são capazes de cobrir grandes áreas em menos tempo, o que os torna ideais para aplicações como vigilância, mapeamento e monitoramento ambiental. Além disso, a autonomia de voo é geralmente superior, permitindo missões prolongadas sem a necessidade de recarga frequente.

E o mais novo modelo são os drones híbridos, que combinam as características de aeronaves de asa fixa e multi-rotor. Essas têm ganhado destaque no campo das RPAs. Segundo Zaludin e Harituddin (2019), esses veículos são projetados para aproveitar as vantagens de ambos os tipos de plataformas, permitindo uma maior flexibilidade em suas operações.

A incorporação da capacidade de decolagem e pouso vertical deu origem às aeronaves do tipo VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*). Esses sistemas combinam a versatilidade do voo em modo *hover* com a eficiência de cruzeiro das asas fixas, permitindo operação em locais sem infraestrutura de pistas. No entanto, enfrentam o

desafio da transição entre os modos de voo, que exige controle preciso para manter a estabilidade e a segurança da aeronave (ZALUDIN; HARITUDDIN, 2019).

Esses drones continuam em fase de desenvolvimento e são específicos principalmente para a entrega de itens aéreos em distâncias específicas. No entanto, apresentam limitações para voos resultantes ou em linha reta (DILEEP, 2020).

Como vimos, os drones apresentam uma grande variedade de configurações, desde multi-rotores a rotor único até modelos de asa fixa e híbridos. Cada um desses tipos possui características específicas. Contudo, para que essas aeronaves não tripuladas operem de maneira eficiente, é fundamental uma integração harmoniosa entre os componentes de hardware e software, a seguir veremos as configurações de componentes para um RPA de asa fixa e como esse conjunto funciona.

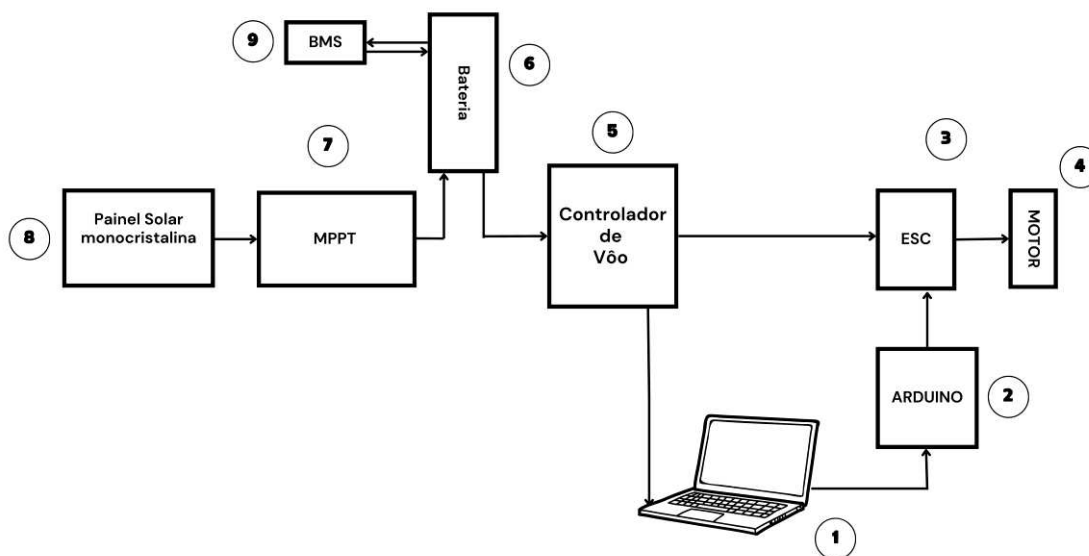
## **2.1 Componentes Integrantes Da Aeronave**

Tendo compreendido o que são drones e seus diversos tipos, neste capítulo abordaremos os componentes que integram o sistema de controle e navegação de uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) e como cada característica e configuração desse conjunto influencia diretamente na sua autonomia.

Segundo Renner et al. (2020), para que a plataforma de asa fixa funcione adequadamente, é essencial a integração de componentes de hardware e software. Os elementos de hardware incluem a estrutura física externa, que compreende o corpo e as asas da aeronave, além do motor, hélice, servos de comando, bateria, controladora de voo, sistema de telemetria, receptor do rádio transmissor, receptor GNSS e sensores de velocidade e pressão do ar.

Os softwares utilizados na operação de voo estão relacionados à telemetria e aos ajustes do controle de voo, que podem ser configurados remotamente. A falha ou erro em qualquer um desses componentes de *hardware*, ou *software* pode comprometer tanto a segurança quanto a execução do voo (RENNER et al., 2020). Para melhor compreensão do circuito, a Figura 1 apresenta a distribuição e interações de alguns destes componentes eletrônicos. A montagem do circuito deve estar de acordo com o esquema dos dispositivos para evitar danos a qualquer um dos componentes.

**Figura 1 - Sistema de componentes de simulação do voo da RPA**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

O esquemático da Figura 1 apresenta o novo esquema utilizado nos testes em bancada da aeronave proposta, considerando apenas os componentes necessários para análise do funcionamento energético do sistema. O número 1 representa a estação de controle em solo, composta por um computador com os programas INAV Configurator e Arduino IDE, utilizados para a interface e visualização de consumo do sistema e para programar o Arduino e simular o comportamento de motor em diferentes fases. O número 2 corresponde ao microcontrolador Arduino, programado para enviar sinais PWM ao ESC, controlando o motor conforme os perfis de voo estabelecidos (subida, cruzeiro e descida).

O número 3 representa o controlador eletrônico de velocidade (ESC), que segundo Franchi e Mallet (2017), é responsável por regular com precisão a velocidade, direção e frenagem de motores *brushless* DC (BLDC), utilizando sinais modulados por largura de pulso (PWM). Esse controle permite ajustar a rotação do motor, representado pelo número 4, de acordo com as necessidades de consumo energético simuladas durante os testes.

Já o número 5 refere-se à controladora de voo, que, embora não tenha sido usada em voo real, foi configurada com o software INAV e utilizada para gerenciamento das respostas aos sinais do Arduino durante os testes.

A bateria de polímero de lítio conhecidas como (Li-Po), indicada pelo número 6, fornece energia ao sistema nos momentos em que a produção solar é insuficiente, funcionando em conjunto com o número 7, o controlador de carga MPPT. Segundo Chu et al. (2021), o MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) é responsável por otimizar a extração de energia das células fotovoltaica, controlando a tensão fornecida pelo arranjo fotovoltaico a um nível adequado para o carregamento eficiente da bateria.

As células fotovoltaicas monocristalinas, indicadas pelo número 8, foram conectadas em diferentes configurações de série e paralelo e testadas quanto à sua capacidade de alimentar o sistema em voo simulado, com variações reais de irradiância solar. O número 9 representa o BMS faz o carregamento e descarregamento balanceado das células da bateria.

A integração destes componentes permitiu a realização de uma simulação funcional do sistema embarcado, avaliando sua resposta energética em diferentes cenários. No tópico a seguir, serão apresentadas as características das células fotovoltaicas utilizadas e sua aplicação em RPAs como alternativa viável para aumento de autonomia.

## **2.2 Energia Fotovoltaica Aplicada Em RPAs**

A aplicação de energia fotovoltaica em RPAs tem demonstrado avanços significativos na ampliação da autonomia e na redução da dependência de carregamento constante das baterias. A seguir, serão apresentados exemplos de projetos que ilustram como essa tecnologia tem sido aplicada de forma inovadora em RPAs.

A aeronave solar *AtlantikSolar*, segundo Oettershagen et al. (2016), é um UAV de baixa altitude e longa duração, projetado para voar até 28 horas ininterruptas. Com envergadura de 5,6 metros e peso de 6,9 kg, utiliza células fotovoltaicas de silício monocristalino de alta eficiência e baterias de íon-Lítio, garantindo autonomia mesmo em condições climáticas adversas. Durante testes, manteve 40% de carga mínima à noite, destacando-se como uma solução promissora para missões de longo alcance, como busca e salvamento, monitoramento ambiental e operações em áreas remotas.

De maneira semelhante, a aeronave eSBXC, desenvolvida pelo NRL (*Naval Research Laboratory*), sua tradução Laboratório de Pesquisa Naval, combina

tecnologia fotovoltaicas e soluções estruturais leves para maximizar sua eficiência em voo. Com envergadura de 4,5 metros e materiais compósitos, destaca-se pela utilização de células fotovoltaicas *Inverted Metamorphic Multi-junction* (IMM) que são Células Fotovoltaicas de Junção Múltipla Invertida e Metamórfica, que proporcionam que são maior eficiência energética e melhor adaptação às superfícies curvas. Seu sistema de gerenciamento de energia permite voos de 4 a 5 horas com a energia armazenada, com potencial de prolongamento ao explorar a energia fotovoltaica e correntes térmicas (EDWARDS et al., 2016).

A aeronave discutida por Ridwan (2019) reforça o impacto positivo da aplicação de painéis fotovoltaicos em RPAs menores. Com envergadura de 1,6 metros e peso de decolagem de 2,125 kg, essa aeronave de asa fixa mostrou ganhos no tempo de voo e na distância percorrida ao integrar células fotovoltaicas, mostrando-se como uma alternativa eficiente em projetos de menor escala.

Um dos componentes mais importantes em um RPA são as baterias, enquanto as baterias fornecem energia confiável e instantânea, os painéis fotovoltaicos contribuem para prolongar o tempo de voo, especialmente em operações de longa duração. Dessa forma, os painéis fotovoltaicos sempre mantêm a bateria carregada (entenda-se como um nível ótimo de operação) e ela fornece a energia necessária para os sistemas da RPA. Esse fluxo de energia controlado aumenta a duração do voo, uma vez que, ao mesmo tempo, em que a bateria é descarregada, ela é carregada pelos painéis fotovoltaicos.

As baterias de Li-Po são amplamente utilizadas em veículos aéreos não tripulados devido à sua alta densidade de energia e design compacto, características essenciais para a eficiência e manobrabilidade desses dispositivos. Segundo Mizat et al. (2023), as baterias Li-Po demandam carregadores específicos que utilizem métodos balanceados para garantir que todas as células atinjam a mesma tensão. Essas baterias analisadas possuem uma tensão nominal de 3,7 V por célula, sendo essa tensão um padrão comum que garante a compatibilidade de todos os sistemas elétricos dos RPAs. Além disso, a amperagem, que se refere à corrente de descarga, varia entre os diferentes tipos de baterias.

A corrente de descarga é um fator crucial, pois determina a quantidade de corrente que a bateria pode fornecer instantaneamente, influenciando diretamente o desempenho das RPAs durante o voo. Baterias com uma corrente de descarga mais alta são capazes de fornecer mais potência, o que é essencial para aplicações que

exigem aceleração rápida, pousos, decolagens, ou manobras complexas (Mizat et al., 2023).

### **2.3 Controladores De Carga**

Em sistemas de energia solar fotovoltaica, o controlador de carga desempenha uma função crítica ao regular a energia proveniente dos painéis fotovoltaicos antes que sejam entregues as baterias. Segundo Perdana (2019), esse dispositivo garante que a tensão e a corrente sejam mantidas dentro de níveis seguros, evitando, sobrecargas e prolongando a vida útil das baterias, sendo, portanto, essenciais para o funcionamento eficiente e seguro dos sistemas fotovoltaicos.

Os controladores de carga mais conhecidos é o Modulador por Largura de Pulso (PWM) e o Rastreamento Máximo de Pontos de Energia (MPPT), que apresentam diferenças significativas em termos de eficiência e funcionalidade.

Segundo Singh et al. (2017), o controlador PWM opera como um interruptor entre o painel fotovoltaico e a bateria, permitindo que a corrente flua apenas quando a tensão do painel é ligeiramente superior à tensão da bateria. Essa abordagem resulta em uma eficiência que varia entre 75% e 80%.

Por outro lado, o controlador MPPT é projetado para extrair a máxima potência do painel fotovoltaico, ajustando continuamente a carga para que a tensão e a corrente sejam otimizadas. O MPPT pode operar em tensões superiores à da bateria, convertendo o excesso de tensão em corrente, o que permite uma eficiência que varia de 94% a 99% (DEEPIKA et al., 2023). Por esses motivos que neste trabalho será empregado o controlador MPPT, pois segundo Singh et al (2017), sua capacidade de maximizar a extração de energia o torna uma escolha superior, especialmente em condições de iluminação variáveis.

O MPPT atua como um conversor DC-DC, ajustando dinamicamente a tensão e a corrente do painel fotovoltaico para otimizar o carregamento da bateria. Em RPAs que utilizam baterias Li-Po, o controlador de carga MPPT desempenha essa função, garantindo que a tensão seja regulada conforme os requisitos da bateria, mantendo aproximadamente 3,7V por célula no processo de carregamento e evitando perdas de eficiência.

Segundo Muthuvalaji et al. (2021), enquanto o PWM é mais simples e de fácil implementação, o MPPT, oferece um desempenho significativamente melhor em termos de aproveitamento de energia, especialmente em sistemas onde a eficiência é crítica. Portanto, a escolha entre PWM e MPPT deve considerar as necessidades específicas do sistema e a importância da eficiência na aplicação em questão.

## 2.4 Células Fotovoltaicas

Compreendida a importância do controlador de carga como componente indispensável em um sistema de geração de energia com células fotovoltaicas, este capítulo apresentou uma explicação técnica sobre essa tecnologia.

Segundo Komp (2001), o efeito fotovoltaico é o fenômeno pelo qual a luz solar é convertida em eletricidade. Esse processo ocorre quando a luz incide sobre um material semicondutor, como o silício, gerando pares de elétrons e lacunas. Quando esses portadores de carga são separados por um campo elétrico interno, resulta uma corrente elétrica que pode ser utilizada para alimentar dispositivos.

O silício (Si) foi identificado como o principal material utilizado na fabricação de células fotovoltaicas, sendo o segundo elemento químico mais abundante na Terra e empregado em formas cristalina, policristalina e amorfa (CEMIG, 2012).

As células fotovoltaicas analisadas neste trabalho se dividiram em duas gerações principais. A primeira geração é composta por células de silício cristalino (c-Si), como as monocristalinas (m-Si) e policristalinas (p-Si), que representavam cerca de 85% do mercado devido à sua eficiência consolidada e confiabilidade (CEPEL & CRESESB, 2014).

A segunda geração é formada por células de filme fino, como as de silício amorfo, CIGS e CdTe, que utilizam camadas finas de material semicondutor com espessura inferior a 1% da das células convencionais.

As células monocristalinas, de acordo com Dobrzański et al. (2012), apresentaram alta eficiência, alcançando até 24% em laboratório e cerca de 20% em aplicações práticas, sendo ideais para locais com espaço limitado. Já as células de silício amorfo, segundo Machado e Miranda (2015), apresentaram eficiência entre 6% e 9%, com destaque para a flexibilidade e baixo custo de produção. Apesar da

vantagem na absorção da luz visível, sofreram com a degradação por exposição contínua, conhecida como efeito Staebler-Wronski.

A escolha da célula adequada mostrou-se fundamental para a maximização do desempenho energético. Ridwan (2019) apresentou a aplicação das células SunPower® C60, do tipo monocristalino, que atingiram até 21% de eficiência e foram dispostas em série, fornecendo tensão suficiente para alimentar sistemas eletrônicos de uma RPA com área total de 0,132 m<sup>2</sup>.

O projeto AtlantikSolar, descrito por Oettershagen et al. (2017), utilizou células SunPower® E60 com eficiência de 23,7% em uma aeronave de 5,69 m de envergadura, alcançando voos superiores a 7 horas de duração, demonstrando a eficácia da integração fotovoltaica em missões de longa autonomia.

A seleção de painéis fotovoltaicos e controladores foi não apenas uma decisão técnica, mas estratégica. O controlador MPPT demonstrou ser essencial para maximizar o aproveitamento da energia captada pelos painéis. Conforme Chu et al. (2021), esse tipo de controlador ajusta o ponto de operação dos painéis para extrair o máximo de energia disponível, mesmo sob condições variáveis de iluminação.

Da mesma forma, os painéis SunPower® se destacaram por sua eficiência elevada, baixo peso e bom desempenho em condições de baixa irradiância, sendo ideais para aplicações embarcadas em RPAs.

A combinação entre controladores MPPT e painéis fotovoltaicos de alto desempenho demonstrou ser eficiente para garantir autonomia, confiabilidade e aproveitamento máximo da energia disponível, fatores essenciais para aplicações prolongadas. Esses elementos serviram de base para o desenvolvimento do sistema de energia aplicado à aeronave estudada neste trabalho, a qual é detalhada no Capítulo 3.

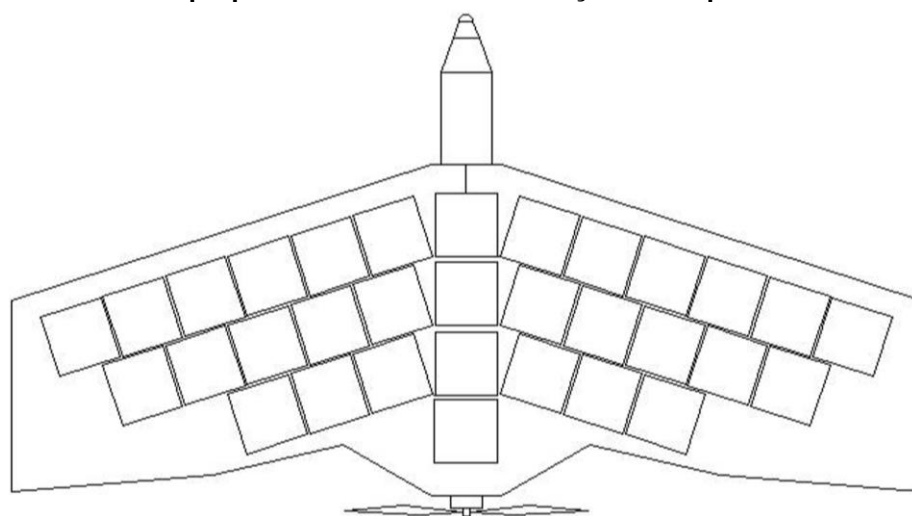
### 3 AERONAVE PROPOSTA PR-SOLARTEC

A aeronave proposta neste trabalho tratou-se de um modelo de asa fixa, que segundo Hasan et al. (2020), permitiu um voo mais estável e eficiente em termos de consumo de energia. Previu-se sua construção com depron por ser um material leve e fácil de manusear, amplamente utilizado em aeromodelos. Para reforço estrutural, especialmente nas asas, considerou-se a utilização de barras de fibra de carbono ou vidro, garantindo maior rigidez com peso reduzido, essencial para suportar esforços durante o voo.

O modelo foi projetado para operar com um único motor elétrico, visto que o foco era alcançar maior tempo de autonomia em voo e não velocidade. Embora a construção completa do aeromodelo não tenha sido realizada, uma vez que o foco deste trabalho é o controle da energia, o projeto concentrou-se na simulação do sistema embarcado de energia e no estudo de arranjos fotovoltaicos aplicáveis à estrutura proposta.

A Figura 2 ilustra a configuração geral da aeronave PR-SOLARTEC, concebida para comportar até 32 células fotovoltaicas SunPower® C60 distribuídas sobre a asa. O desenho esquemático apresentado possui caráter ilustrativo, uma vez que o foco central deste trabalho foi a análise das configurações de ligação dos painéis fotovoltaicos, buscando a melhor entrega de energia à bateria com base em testes práticos de bancada e de simulações.

**Figura 2 - Modelo proposto da RPA com construção em Depron PR-SOLARTEC**



Fonte: Autoria própria (2025)

Destaca-se que o projeto estrutural detalhado da aeronave não foi o escopo deste trabalho, por fugir do campo de atuação da Engenharia Elétrica. Assim, as definições físicas da PR-SOLARTEC limitaram-se àquelas necessárias para estimativas de área disponível, peso, distribuição dos componentes e análise da viabilidade do sistema energético embarcado.

Além disso, deve-se considerar que aeronaves do tipo asa fixa, especialmente no formato delta como o utilizado neste trabalho, apresentam características aerodinâmicas que exigem maior habilidade de controle. Por esse motivo, sua operação demanda treinamento específico por parte do piloto, tornando-se um desafio adicional para a realização de voos estáveis e seguros.

Toda a eletrônica simulada incluindo controladora de voo, motor, controlador de carga, sensores e bateria foi integrada virtualmente à estrutura da asa, como forma de representar a disposição esperada para uma aeronave funcional. A seção a seguir apresenta o sistema de energia desenvolvido e testado para a PR-SOLARTEC.

### **3.1 Sistema de Energia da PR-SOLARTEC**

O sistema de energia da aeronave PR-SOLARTEC desempenhou um papel central na escolha de todos os componentes eletrônicos utilizados nos testes de bancada. Considerando as configurações físicas da asa e o design voltado à maximização da área útil para captação solar, os sistemas foram integrados de forma compacta de modo a permitir o aproveitamento total da estrutura da asa para a instalação dos painéis fotovoltaicos.

O sistema de propulsão utilizado neste projeto foi composto por um motor elétrico Turnigy D3548-4 Brushless 1100kv que é responsável pela propulsão da aeronave e para simulações. Na Figura 3 é possível visualizar a instalação do motor em um suporte de testes, proposto para permitir a análise prática do consumo energético durante diferentes fases simuladas de voo.

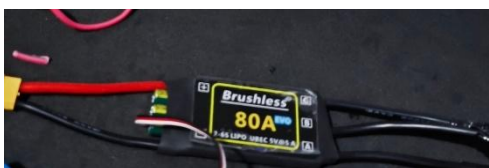
**Figura 3 - Motor Turnigy D3548-4 Brushless utilizado nas simulações**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

O motor foi alimentado por um (ESC) de 80 A, responsável por regular a potência fornecida ao motor conforme exigido em cada etapa de teste. Esse componente é ilustrado na Figura 4 e teve um papel fundamental no controle da rotação do motor, proporcionando maior estabilidade durante a simulação das fases de voo. Essa combinação entre motor e ESC foi projetada para impulsionar uma carga total de até 2 kg a qual inclui todo o peso asa, como os painéis fotovoltaicos, bateria e demais peças necessárias.

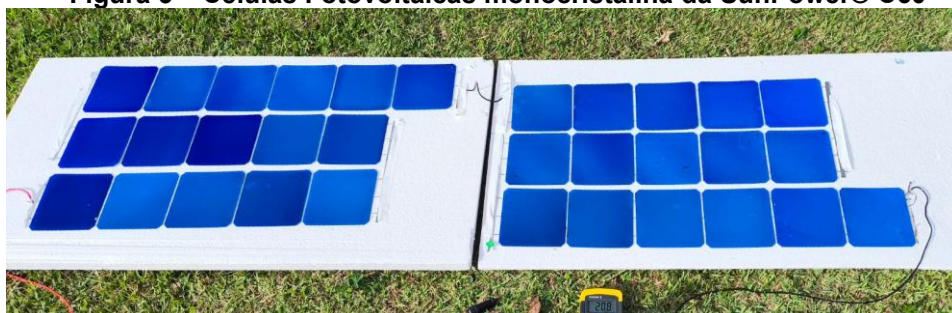
**Figura 4 – Controlador Eletrônico de Velocidade de 80A**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Apresentada logo a seguir, a Figura 5 mostra o conjunto de 32 células fotovoltaicas monocristalinas SunPower® C60 utilizadas neste projeto. Conectadas em série, as células compuseram um arranjo capaz de fornecer cerca de 20 V de tensão e 4,7 A no dia dos testes.

**Figura 5 – Células Fotovoltaicas monocristalina da SunPower® C60**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

A energia gerada foi gerenciada por um controlador de carga MPPT PowMr de 15A e 50V, compatível com o projeto, pois suporta sistemas de 12V e 24V, adequados para baterias de lítio e pesando cerca de 237g. Ele utiliza a tecnologia MPPT, maximizando a eficiência da carga solar com conversão superior a 98% e rastreamento do ponto de potência acima de 99%, garantindo melhor aproveitamento da energia (DEEPIKA et al., 2023).

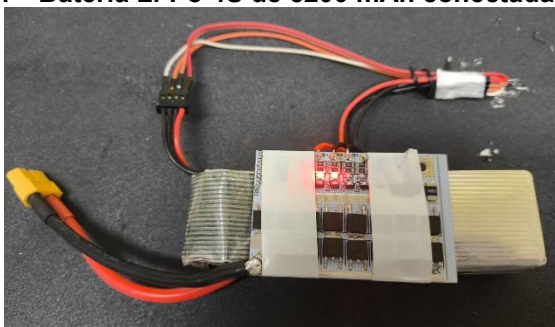
**Figura 6 - Controlador de Carga MPPT PowerMr**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Para o armazenamento de energia utilizou-se uma bateria Li-Po 4S de 5200 mAh conectada a um Sistema de Gerenciamento de Bateria (do inglês, *Battery Management System* (BMS)), que assegurou o balanceamento e a proteção das células durante os ciclos de carga e descarga. Esse dispositivo, conforme o próprio nome diz, balanceia a carga em cada célula da bateria, garantindo que todas possuam o mesmo potencial elétrico. Isso é extremamente importante uma vez que ao perder uma célula, tais baterias se tornam instáveis e, em muitos casos, incendeiam. A Figura 7 apresenta o BMS conectado a bateria de forma simples.

**Figura 7 - Bateria Li-Po 4S de 5200 mAh conectada ao BMS**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Um microcontrolador Arduino UNO foi adicionado ao sistema e é apresentado na Figura 8. Ele possui a função de simular cada um dos diferentes estágios de voo da aeronave. Além disso, esse dispositivo gera os sinais (PWM) que são enviados ao ESC, assegurando para que as transições entre os estágios de voo ocorram de forma segura.

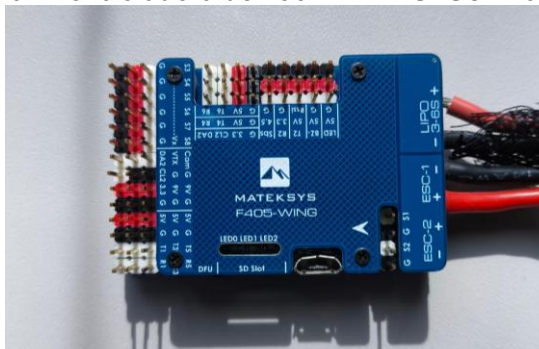
**Figura 8 – Microcontrolador Arduino UNO utilizado para simular os estágios de voo**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

A controladora de voo Matek MATEKSYS® F405-WING continuou sendo utilizada por meio do software de código aberto INAV para registrar o comportamento do sistema. Justifica-se o emprego da controladora nos testes, pois ela por si só gasta uma energia do sistema para se manter somente ligada. Já em voo seu gasto aumenta, pois ela alimenta os servos, os motores, GPS e sistemas de telemetria. Isso faz com que em voo (ou em simulação de voo) seu gasto de energia aumente e por isso ela foi empregada nos testes.

**Figura 9 - Controladora de voo MATEKSYS® F405-WING**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Como os testes foram realizados em bancada, não foram utilizados GPS, rádio controle, telemetria nem receptor, originalmente previstos. Isso se justifica pelo elevado valor aquisitivo e por seu gasto energético pequeno quando considerado com a propulsão da asa. Os dados relevantes para os testes foram obtidos diretamente via software, o que simplificou a análise do sistema energético nas simulações.

## 4 MÉTODOLOGIA

Este Trabalho de Conclusão de Curso caracteriza-se como uma pesquisa experimental e aplicada, voltada à avaliação do desempenho energético de sistemas fotovoltaicos integrados a RPAs de asa fixa. Por meio de testes práticos e simulações em bancada, buscou-se identificar o arranjo mais adequado de células fotovoltaicas capaz de ampliar a autonomia de voo da aeronave, reduzindo sua dependência exclusiva da bateria.

Para a análise de desempenho energético do sistema fotovoltaico e dados de irradiância do dia, utilizou-se o software PVsyst 8.0.12 em sua versão de avaliação com validade de 30 dias, enquanto as análises de dados coletados nos testes experimentais foram tratadas e organizadas com o auxílio do Microsoft Excel. Adicionalmente, o software MATLAB R2025a foi empregado na modelagem computacional do carregamento da bateria, contribuindo para a verificação dos resultados obtidos.

Foram empregadas medições de irradiância solar utilizando o Medidor de Energia Ultravioleta Solar Portátil Radiometer LX, apresentado na Figura 9. Isso permitiu uma análise mais precisa das condições ambientais e da influência da radiação solar no desempenho das células fotovoltaicas. Também, foi fundamental para a interpretação dos dados obtidos, especialmente no que se refere às variações de corrente gerada em diferentes momentos do dia e sob diferentes níveis de nebulosidade.

**Figura 10 - Medidor de Energia Ultravioleta Solar Portátil Radiometer LX**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

A pesquisa foi de natureza experimental, pois envolveu a realização de testes sob diferentes condições de irradiação solar e arranjos elétricos distintos, manipulando variáveis como o número de células, o tipo de ligação (série e paralelo), a tensão e a corrente fornecidas ao sistema. Também foi considerada aplicada, visto que buscou resolver um problema prático: assegurar a geração e o aproveitamento contínuo de energia elétrica embarcada em aeronaves de pequeno porte, a fim de ampliar sua autonomia.

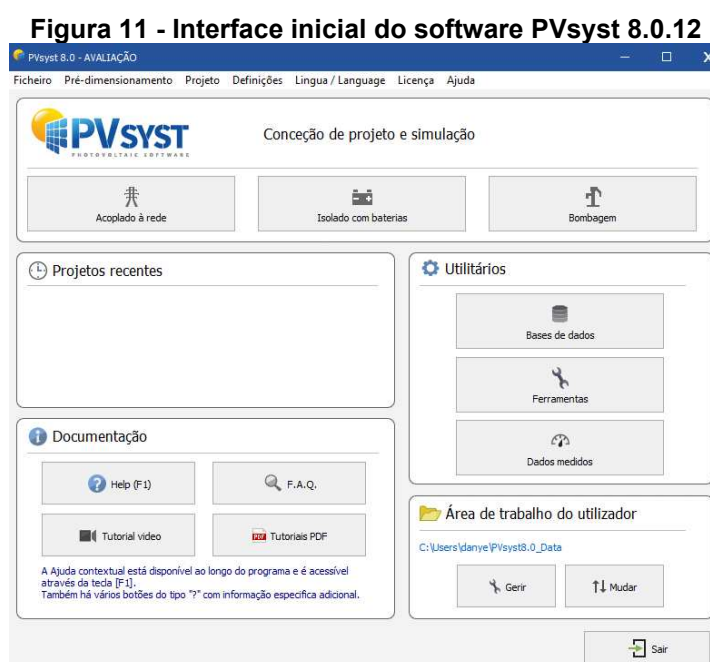
#### **4.1 Métodos**

Os testes foram realizados tanto em bancada quanto ao ar livre, com todos os componentes eletrônicos essenciais da aeronave devidamente integrados e em pleno funcionamento. Entre os principais elementos do sistema estavam o motor brushless, o ESC, a controladora de voo, o Arduino, o controlador de carga MPPT, as células fotovoltaicas e a bateria Li-Po. O controle da operação foi feito por meio do software INAV, em conjunto com um código desenvolvido em Arduino, o qual simulava os diferentes perfis de voo, como subida, cruzeiro e descida por meio da variação da potência aplicada ao motor.

Dando continuidade aos experimentos, foram utilizados diferentes arranjos de células fotovoltaicas SunPower® C60 com o objetivo de analisar o comportamento elétrico do sistema em distintas configurações. Os arranjos testados incluíram: 2S, 3S, 4S2P, 8S2P, 16S e 32S. Nessa nomenclatura, a letra S indica o número de células conectadas em série, o que eleva a tensão do sistema, enquanto P representa células em paralelo, aumentando a corrente disponível. Cada uma dessas configurações constitui uma string, termo utilizado para definir o agrupamento de células fotovoltaicas interligadas eletricamente, formando um subsistema de geração.

Em cada arranjo foram realizadas medições de tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ). Além disso, nos testes de simulação de voo, foi monitorado o desempenho real dos painéis fotovoltaicos na configuração 32S, bem como o funcionamento do controlador de carga MPPT e o comportamento do sistema durante o carregamento das baterias LiPo de 3 e 4 células, em diferentes condições de irradiação.

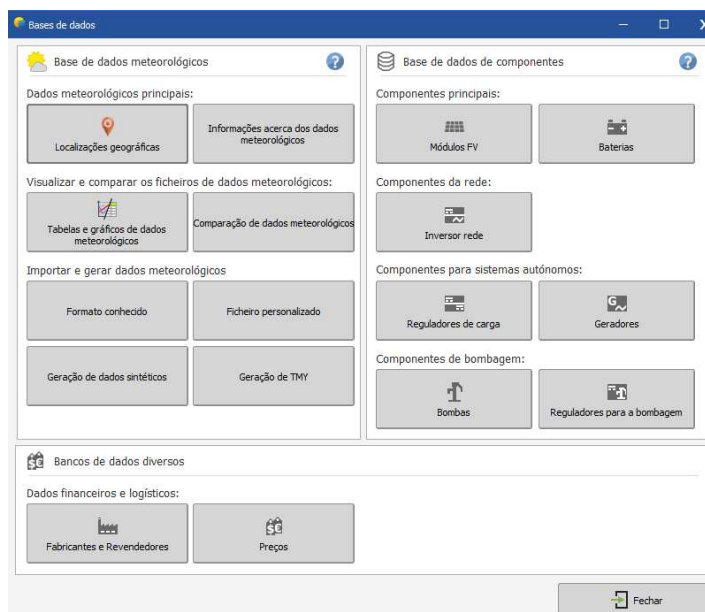
Morais (2022) utiliza para complementar os dados experimentais e realizar uma análise mais abrangente do sistema energético, foi utilizado o software PVsyst 8.0.12, igualmente ao empregado neste trabalho. Esse recurso possibilitou o acesso a um banco de dados meteorológicos detalhados para a cidade de Medianeira-PR, bem como a inclusão das especificações técnicas das células fotovoltaicas empregadas no projeto, conforme ilustrado na Figura 11, que apresenta a interface inicial do programa.



**Fonte: Software PVsyst (2025)**

Após acessar o menu “Bases de dados”, foi selecionado o local geográfico correspondente à área de interesse, permitindo ao software importar os dados climáticos necessários. Como o município de Medianeira-PR não está incluído nos dados meteorológicos padrão do PVsyst, foi preciso adicioná-lo manualmente. Isso foi feito por meio da aba “Localizações geográficas”, dentro da seção “Dados meteorológicos principais”, conforme apresentado na Figura 12.

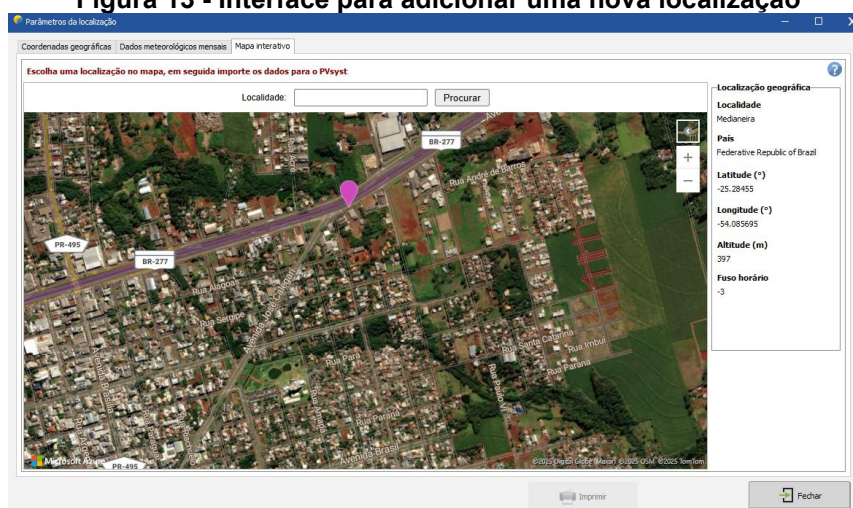
**Figura 12 - Interface "Base de Dados" do PVsyst**



Fonte: Software PVsyst (2025)

Ao acessar a funcionalidade “Localizações geográficas”, foi utilizada a opção “Novo”, que abriu a janela denominada “Mapa interativo”. No campo destinado à localidade, foi inserido o nome Medianeira-PR para cadastrar o município no PVsyst, conforme ilustrado na Figura 13.

**Figura 13 - Interface para adicionar uma nova localização**



Fonte: Software PVsyst (2025)

Para identificar e configurar o painel no PVsyst, na aba “Bases de dados” conforme representado na Figura 12 foi acessada a opção “Módulos FV”. Nessa seção

foi selecionado um modelo de painel da marca SunPower como referência, sendo criado um módulo personalizado. Nele foram ajustados parâmetros como o número de células, corrente de curto-circuito, tensão em circuito aberto e potência gerada, conforme as características do painel utilizado no projeto e conforme apresenta a Figura 14.

**Figura 14 - Dados do módulo SunPower C60 adaptado**

**Definição de um módulo FV**

Dados de base | Dimensões e tecnologia | **Parâmetros modelo** | Dados adicionais | Measured Data | Comercial | Gráficos

Modelo: C60 | Fabricante: SUNPOWER  
 Nome ficheiro: SUNPOWER.PAN | Fonte dados: Manufacturer  
 Parâmetros definidos pelo utilizador | Prod. desde 2015 até 2024

Potência nom. 102.1 Wp Tol. -/+ N/A | N/A %  
 (em STC)  
 Tecnologia: Si-mono

**Especificações do fabricante ou outras medidas**

Condições de referência	GRef	1000	W/m <sup>2</sup>	TRef	25	°C
Corrente de curto-circuito	Isc	6.240	A	Circuito aberto Vco	20.61	V
Ponto de potência máx.	Imp	5.830	A	Vmpp	17.50	V
Coeficiente de temperatura	muisc	1.8	mA/°C	N° de células em série	32 em série	
	ou muisc	0.029	%/°C			

**Resultados do modelo interno**

Condições de funcionamento	GOper	1000	W/m <sup>2</sup>	TOper	25	°C
Ponto de potência máx.	Pmp	102.1	W	Coef. de temperatura	-0.37	%/°C
	Corrente Imp	5.91	A	Tensão Vmpp	17.3	V
Corrente de curto-circuito	Isc	6.24	A	Circuito aberto Vco	20.6	V
Eficiência	/ Superf. células	20.43	%	/ Superf. módulo	40.86	%

**Resumo do modelo**

**Parâmetros principais**

R paral.	1000 Ω
Rperal(G=0)	4000 Ω
R série model	0.10 Ω
R série máx.	0.18 Ω
R série aparente	0.25 Ω

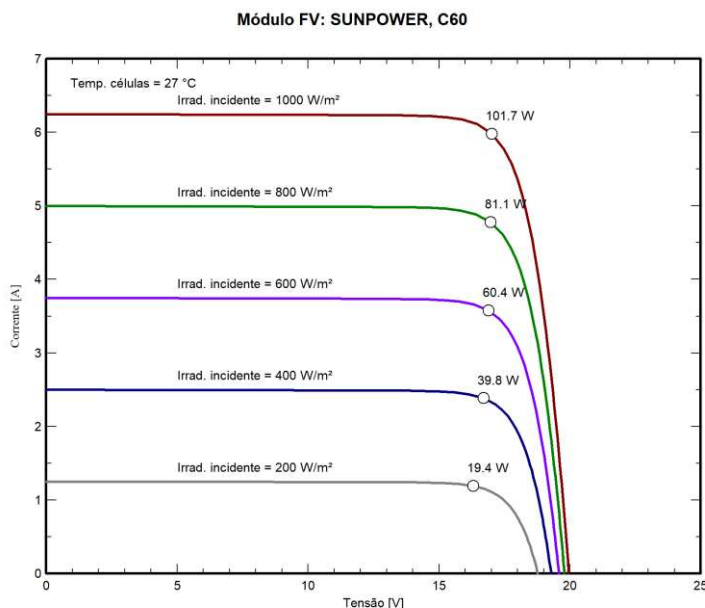
**Parâmetros modelo**

Gamma	1.121
IoRef	1.19 nA
muVco	-60 mV/°C

Mostrar otimização | Copiar para a tabela | Imprimir | Anular | OK

Fonte: Software PVsyst (2025)

Com os dados meteorológicos inseridos e o módulo fotovoltaico configurado, foram geradas as curvas características corrente por tensão do painel, possibilitando a análise de seu comportamento elétrico em diferentes condições de irradiância. Essas curvas podem ser observadas na Figura 15 para o sistema com 32 células e a uma temperatura de 27 °C.

**Figura 15 – Curvas corrente por tensão do Pannel SunPower**

Fonte: Software PVsyst (2025)

Todos os testes experimentais e medições foram conduzidos nas instalações do campus Medianeira da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), utilizando os equipamentos e infraestrutura laboratorial disponíveis. Para fins de transparência e controle orçamentário, apresenta-se no Apêndice 4.2 uma tabela com a discriminação dos custos envolvidos na execução do projeto, incluindo aquisição de componentes, materiais e instrumentos utilizados nas etapas práticas da pesquisa.

## 4.2 Recursos Materiais e Financeiros

Para o desenvolvimento deste trabalho foram necessários, além da estrutura disponibilizada pela universidade, o material apresentado na Tabela 1. Os custos do projeto foram financiados pela autora, pelo coorientador Ricardo Senandes e o material Depron fornecido pelo professor Claudio Loenes Bazzi, garantindo a viabilidade da execução prática do projeto.

**Tabela 1 – Componentes e Peças necessárias para a montagem da Simulação da RPA PR-SOLARTEC**

Equipamento	Especificação	Quantidade	Preço
-------------	---------------	------------	-------

Motor Brushless D3548	1100KV 911W	1	229,90
Hélices dobrável	12x6,5 18g	2	24,5
ESC 80A	80A 38g	1	138,67
Servos ES08MAII	9g	4	194,10
Medidor de tensão	17g	2	23,45
Bateria 2200 mAh	Lipo 4S 30C 230g	1	175,00
Bateria 5200mAh	Lipo 3S 120C 490g	1	244,51
Controlador de Carga	PowMr MPPT POW-LTW-15A	1	224,20
Controlador de voo Matek	168MHz, Flash 1MB 25g	1	284,89
Carregador Balanceador	80W	1	230,80
BMS 100A	17g	2	50,5
BMS 40A	15g	1	10,07
Fio Plug conector	2,54mm	5	18,89
Cabo de Carga	12awg	1	31,43
Conector Mr60	Macho Fêmea	3	21,23
Adaptador de lâmina	dobrável	1	31,09
Conectores XT-60	Macho e Fêmea	5	12,89
Fio de silicone conector	Macho Fêmea	2	20,40
Servo testador		1	13,75
Celulas SUNPOWER C60		40	905,1
Níquel e fluxo de solda		1	196,54
Cabos macho e fêmea		30	30,00
Depron		10	340,00
		Total	3451,91

---

**Fonte: Autoria própria (2025)**

Os resultados obtidos durante essa etapa foram fundamentais para a análise do desempenho do sistema e são apresentados no Capítulo 5, onde se encontram detalhadas as medições, registros e observações pertinentes às atividades práticas realizadas.

## 5 TESTES E RESULTADOS

Durante a fase experimental as strings 8S4P e 4S8P não foram implementadas, pois, com base nos dados teóricos e em testes preliminares, verificou-se que essas configurações não atingiriam a tensão mínima necessária para acionar o controlador de carga MPPT. Diante disso, foram testados arranjos com maior número de células em série, destacando-se as strings 16S e 32S, ou seja, compostas por 16 e 32 células conectadas em série, respectivamente. O objetivo foi analisar o comportamento da tensão e da corrente geradas sob diferentes condições de irradiância, a fim de avaliar o desempenho energético do sistema.

As medições referentes ao Teste 1 foram realizadas sob céu aberto, no dia 28 de abril às 13h30. Os valores gerados pelo software PVsyst 8.0.12, utilizando dados da base Meteonorm 8.2 para a região de Medianeira-PR, onde os valores simulados de irradiância horizontal e temperatura ambiente, os quais contribuíram para a análise dos resultados obtidos. Esses dados são apresentados na Tabela 2 e cabe salientar que alguns horários foram suprimidos pois não foram utilizados para realizar teste.

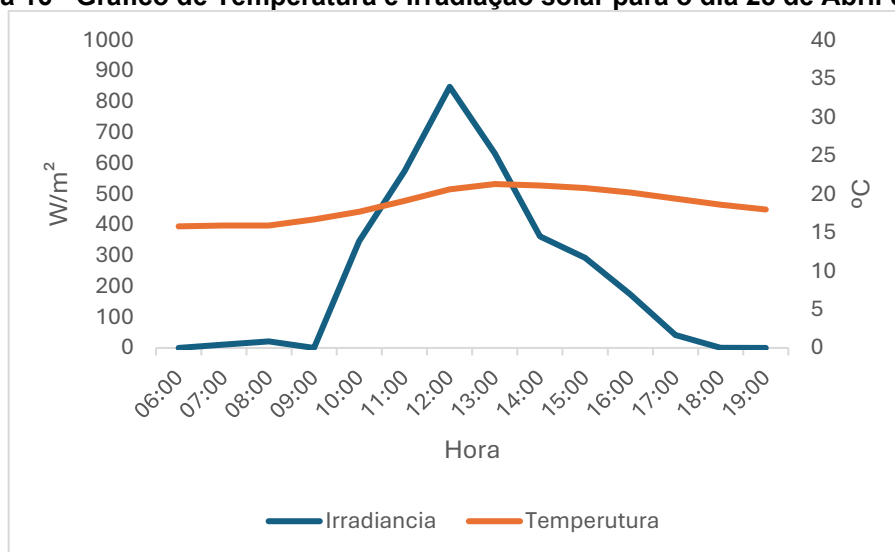
**Tabela 2 – Dados de Temperatura e Irradiação Solar do dia 28 de abril**

Início do intervalo	Irradiância W/m <sup>2</sup>	Temperatura °C
28/04 06h00	0.0	15.8
28/04 07h00	10.7	15.9
28/04 08h00	20.7	15.9
28/04 09h00	182.9	16.7
28/04 10h00	346.5	17.7
28/04 11h00	574.7	19.1
28/04 12h00	848.6	20.6
28/04 13h00	632.2	21.3
28/04 14h00	362.3	21.1
28/04 15h00	292.3	20.8
28/04 16h00	174.6	20.2
28/04 17h00	42.5	19.4
28/04 18h00	0.1	18.6
28/04 19h00	0.0	18.0

Fonte: Autoria própria (2025)

Para uma análise visual da variação diária da irradiação solar e temperatura registrados em 28 de abril, foi construído um gráfico que correlaciona essas duas variáveis com o tempo, permitindo uma clara visualização das tendências e picos ao longo do dia como mostra a Figura 16. Notavelmente o comportamento é muito próximo ao esperado com seu maior pico é próximo às 12h.

**Figura 16 - Gráfico de Temperatura e Irradiação solar para o dia 28 de Abril de 2025**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Durante os testes foi observada uma corrente média  $I_{sc}$  de 2,5 A e uma tensão média de  $V_{oc}$  de 0,6 V por célula, valores significativamente inferiores aos especificados pelo fabricante das células SunPower® C60. De acordo com os dados teóricos sob Condições Padrão de Teste (STC), seriam esperados uma  $I_{sc}$  de 6,24 A e uma  $V_{oc}$  de 0,68 V por célula. Essa discrepância evidencia a forte influência das condições ambientais reais, como irradiação e temperatura no desempenho do sistema fotovoltaico.

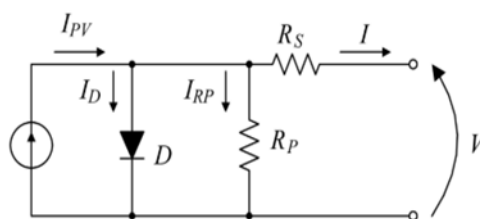
**Tabela 3 - ( $I_{sc}$ ) e ( $V_{oc}$ ) das strings Fotovoltaicos no Teste 1**

Teste 1	( $I_{sc}$ )	( $V_{oc}$ )
2S	3,57	1,29
3S	4,73	1,93
2S2P	4,3	1,29
2S3P	5,2	1,29
4S2P	8,65	2,53

Fonte: Autoria própria (2025)

Quando as células são conectadas em série observa-se um incremento gradual da corrente de curto-circuito até atingir seu ponto de saturação, correspondente ao  $I_{sc}$  máximo. Este fenômeno pode ser explicado pela análise do circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, conforme ilustrado na Figura 17. O circuito inclui uma fonte de corrente fotogerada ( $I_{pv}$ ), um diodo ( $D$ ) representando a junção PN, uma resistência série ( $R_s$ ) associada a perdas ôhmicas e uma resistência paralela ( $R_p$ ) relacionada as impurezas e os defeitos na estrutura (FREITAS, 2020).

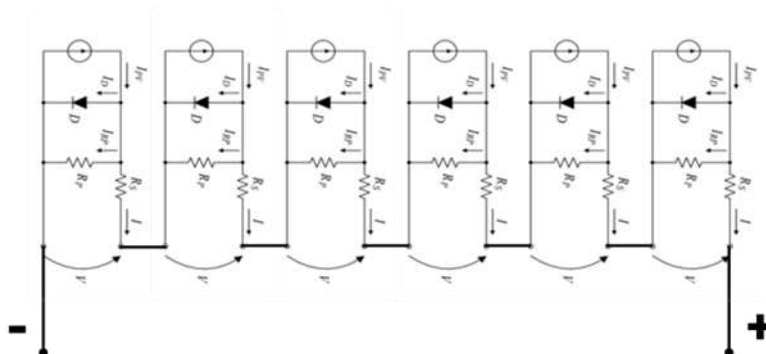
Figura 17 - Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica



Fonte: Freitas (2020)

Quando células reais são conectadas em série como apresentado na Figura 18, essas resistências internas e características não lineares dos diodos afetam a distribuição de tensão e corrente do sistema.

Figura 18 – Demonstração de um circuito interno em série de células fotovoltaicas



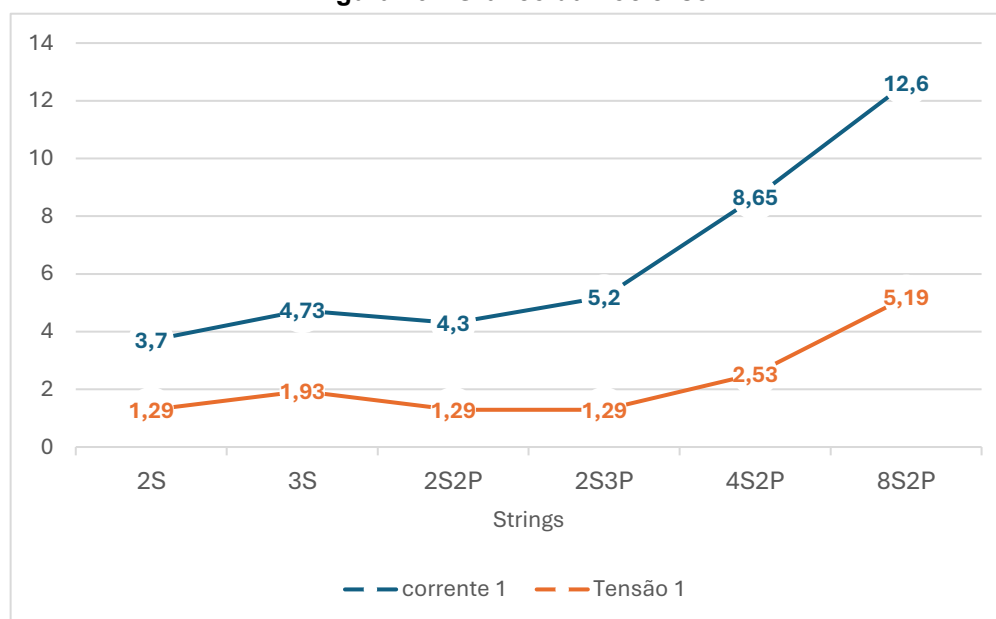
Fonte: Adaptado de Freitas (2020)

Na prática, a corrente de curto-circuito não é limitada apenas pelo valor da menor corrente entre as células, pois pequenas diferenças nas condições de irradiância, temperatura ou até mesmo fabricação ou defeitos causam variações que influenciam o comportamento coletivo do arranjo. Além disso, o somatório das tensões das células em série faz com que o ponto de operação de cada célula se desloque ao longo de sua curva I–V. Isso pode levar a uma operação mais próxima do ponto de máxima geração em algumas células, contribuindo para um aumento aparente da corrente medida na saída do conjunto.

Por fim, ao observar os dados experimentais, constata-se que arranjos como o 8S2P, que unem série e paralelo, conseguem maximizar tanto tensão quanto corrente, atingindo valores mais próximos do desempenho esperado em condições ideais, ao mesmo tempo que compensam parcialmente os efeitos não lineares e as perdas internas de cada célula.

A Figura 19 apresenta graficamente os resultados para o Teste 1, destacando os valores de corrente de Isc e Voc obtidos em diferentes arranjos de células fotovoltaicas. Observa-se que as strings com mais conexões em paralelo, como a string 8S2P, geraram maior corrente, atingindo 12,6 A, enquanto as strings exclusivamente em série, como o 3S, mantiveram correntes mais baixas.

**Figura 19 - Gráfico da Voc e Isc**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

A tensão, por sua vez, permaneceu praticamente constante nas strings com duas células em série, apresentando aumento apenas a partir do 4S2P, até alcançar 5,19 V na string 8S2P. Esses resultados reforçam o princípio de que conexões em série elevam a tensão, enquanto o paralelismo amplia a corrente total do sistema. Comportamento esperado e conforme a Lei de Ohm.

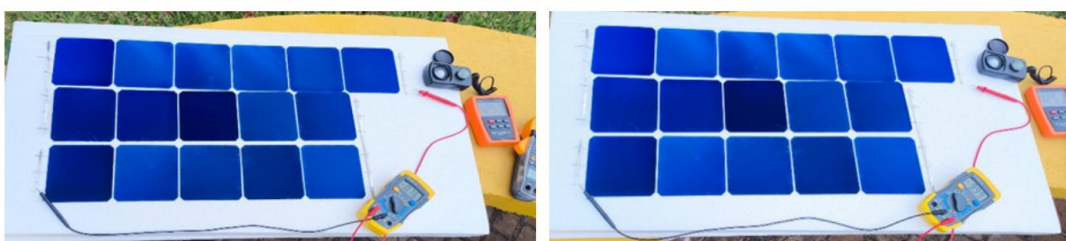
No Teste 2, realizado às 15h50 do dia 7 de maio de 2025, em um dia nublado com irradiância de apenas 125,3 Wh/m<sup>2</sup>, o arranjo 16S apresentou baixo desempenho, registrando uma corrente de apenas 0,76 A e uma tensão de 9,99 V. Esse resultado foi diretamente influenciado pela baixa incidência solar e pelo horário em que o teste foi conduzido, fatores que comprometem significativamente a geração de energia pelos módulos fotovoltaicos ilustrados na Figura 20.

**Tabela 4 - Isc e Voc dos string Fotovoltaicos teste 2**

Teste 2	Corrente de Curto-Circuito(A)	Tensão de Circuito Aberto(V)
16S	0,76	9,99

**Fonte: Aatoria própria (2025)**

**Figura 20 – Imagens do sistema fotovoltaico para medições da Isc e Voc para o Teste 2**



**Fonte: Aatoria própria (2025)**

O Teste 3 foi realizado às 15 h do dia 8 de maio de 2025, sob uma irradiância intermediária de 552 Wh/m<sup>2</sup> e apresentou uma recuperação parcial dos valores de geração elétrica. O arranjo 8S2P obteve o melhor desempenho, com corrente de 7,32 A, destacando-se entre os demais. Os dados completos e comparativos estão apresentados na Tabela 5.

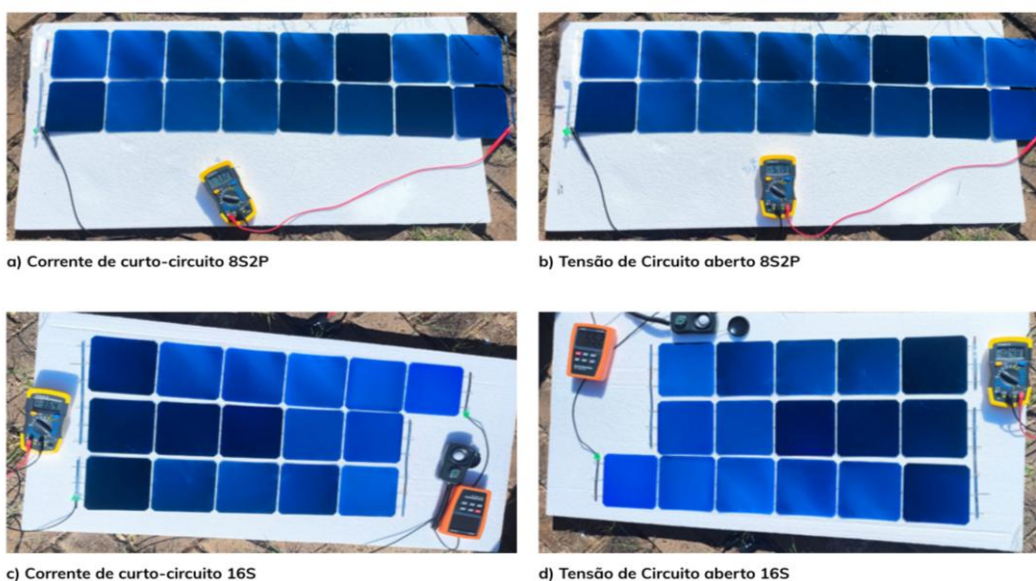
**Tabela 5 - Isc e Voc das strings Fotovoltaicos teste 3**

Teste 3	Corrente de Curto-Circuito(A)	Tensão de Circuito Aberto(V)
8S2P	7,32	5,19
16S	3,64	10,48

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 21 apresenta os painéis e suas medições de corrente e tensão dos arranjos 8S2P e 16S realizadas durante o Teste 3. Para o arranjo 8S2P, a corrente registrada foi de 7,32 A e a tensão de circuito aberto de 5,19 V. Em comparação com o Teste 1, no qual o mesmo arranjo obteve 12,6 A e 5,05 V, nota-se uma redução significativa na corrente gerada.

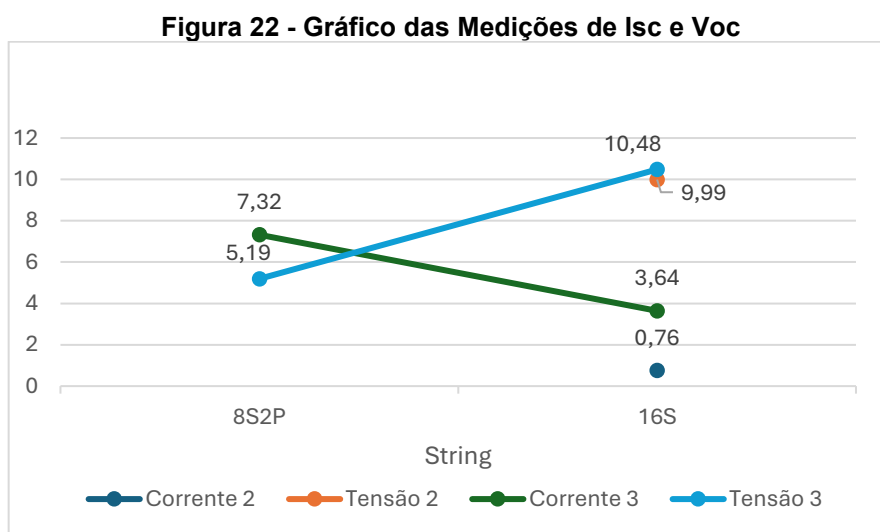
No caso do arranjo 16S, observou-se um aumento tanto na corrente quanto na tensão em relação aos valores obtidos no Teste 2, indicando melhora nas condições de irradiância e desempenho do sistema.

**Figura 21 - Medições - Isc e Voc teste 3**

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 22 apresenta o gráfico comparativo dos Testes 2 e 3, evidenciando que, apesar da significativa diferença de irradiância entre os dois dias, a tensão se manteve relativamente estável. No entanto, observa-se uma variação expressiva na

corrente gerada, refletindo diretamente o impacto da irradiância na capacidade de geração de energia do sistema.



Fonte: Autoria própria (2025)

A discrepância entre os valores teóricos e os medidos evidencia uma característica fundamental dos módulos fotovoltaicos: seu comportamento distinto de fontes elétricas convencionais, uma vez que não apresentam tensão de saída constante em seus terminais. Na realidade, tanto a tensão quanto a corrente de operação são variáveis interdependentes, cujos valores são determinados pelas condições de carga do sistema (VILLALVA et al., 2012).

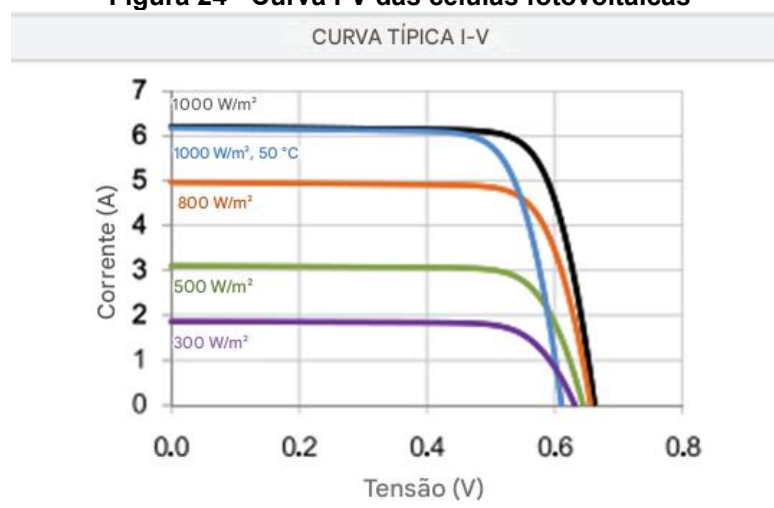
A Figura 23, retirada do datasheet da célula SunPower® C60, ilustra os valores típicos de corrente de curto-circuito (Isc) e tensão de circuito aberto (Voc) por célula, os quais serviram como referência teórica para análise dos resultados experimentais.

**Figura 23 - Valores teóricos do Datasheet**

Características elétricas de uma célula típica em condições de teste padrão (STC)						
STC: 1000W/m <sup>2</sup> , AM 1,5g e temperatura da célula 25°C						
Bin	P <sub>mpp</sub> (Wp)	Ef %	V <sub>mpp</sub> (V)	I <sub>mpp</sub> (A)	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (A)
G	3.34	21.8	0.574	5.83	0.682	6.24
H	3.38	22.1	0.577	5.87	0.684	6.26
I	3.40	22.3	0.581	5.90	0.686	6.27
J	3.42	22.5	0.582	5.93	0.687	6.28

Fonte: Adaptado de SUNPOWER CORPORATION (2010)

Para compreender melhor como a incidência solar influencia o desempenho das células podemos observar a Figura 24 - Curva I-V das células fotovoltaicas, retirada do datasheet da célula fotovoltaica SunPower C60, a qual ilustra o comportamento da corrente (I) em função da tensão (V) sob diferentes níveis de irradiância solar. À medida que a incidência solar aumenta, observa-se um aumento significativo na corrente gerada, mantendo a tensão quase constante.

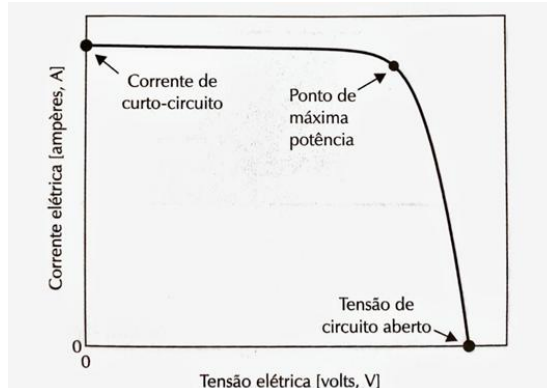
**Figura 24 - Curva I-V das células fotovoltaicas**

Fonte: Adaptado de SUNPOWER CORPORATION (2010)

Essa curva é fundamental para compreender o desempenho da célula em condições reais de operação e auxilia no dimensionamento adequado do arranjo

fotovoltaico. Ela mostra como que a corrente se mantém quase constante para uma determinada irradiância. Já a tensão cresce até um ponto de máxima potência e a partir disso cai, levando ao entendimento de que mesmo que ao ultrapassar esse ponto a tensão tende a se manter constante e a corrente reduzir-se significativamente.

**Figura 25 - Curva característica corrente-tensão (I-V)**



**Fonte: Villalva (2012)**

Curva I-V representada pela Figura 25 apresenta três regiões distintas: uma corrente quase constante próxima a  $I_{sc}$  (curto-circuito), uma queda abrupta no "joelho" da curva (região do ponto de máxima potência) e um rápido decaimento em direção a  $V_{oc}$  (tensão em circuito aberto), demonstrando a relação não linear entre corrente e tensão em diferentes condições operacionais (VILLALVA, 2012).

**Figura 26 - A curva característica potência-tensão (P-V)**



**Fonte: Villalva (2012)**

Já Curva P-V Derivada diretamente da curva I-V e apresentada na Figura 26, exibe um ponto de máximo global (MPP) onde ocorre a máxima transferência de

energia, com comportamento aproximadamente linear em baixas tensões e decaimento exponencial após o ponto máximo, evidenciando a importância do rastreamento do ponto de máxima potência para otimização do sistema (VILLALVA, 2012).

A obtenção do valor máximo de corrente de curto-circuito especificado pelo fabricante (6,24 A) representa um desafio operacional, pois exige condições ideais de irradiância solar de 1000W/m<sup>2</sup> associadas a uma temperatura controlada de 25°C - parâmetros típicos de laboratório que raramente são replicados em ambientes reais de operação.

### 5.1 Configurações do controlador de carga

Com base na Figura 27 do manual do controlador PowMr MPPT POW-LTW-15A, o comportamento do equipamento segue uma lógica de operação bem definida e eficiente, especialmente projetada para sistemas fotovoltaicos de 12V ou 24V com baterias de lítio ou chumbo-ácido.

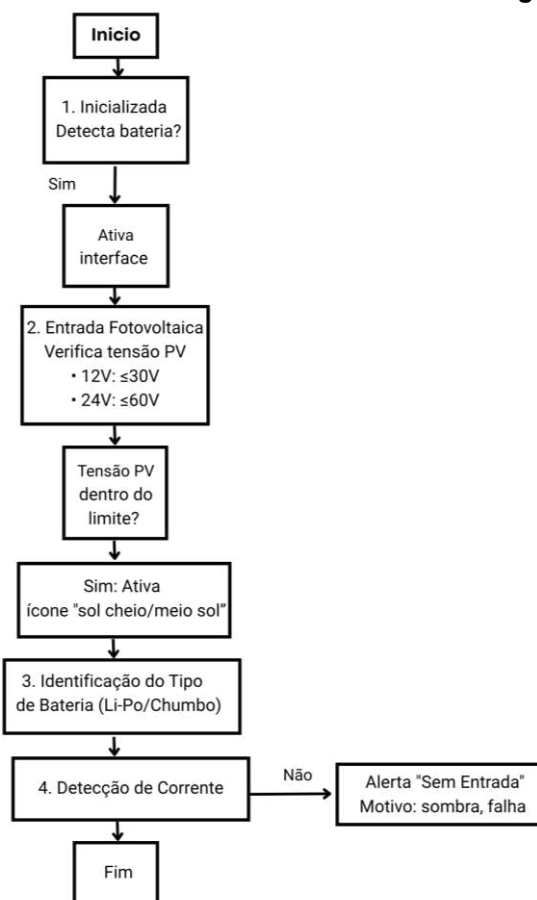
**Figura 27 - Funcionamento do Controlador de carga**

Parâmetros	Tipo de Bateria				
	CÉLULA	GEL	F04	F08	USAR
Aumente a tensão de carregamento	14,4V	14,2 V	14,4V	28,8 V	9,0~17,0V
Tensão de carregamento flutuante	13,8 V	13,8 V	14,0V	28,0V	9,0~17,0V
Tensão de retorno de rastreamento MPP	13,2V	13,2V	13,2V	26,4 V	9,0~17,0V

**Fonte: Manual do Controlador de Carga MPPT 15A 50V (2025)**

Para melhor compreensão do funcionamento do controlador a Figura 27 apresenta um fluxograma ilustrativo do seu funcionamento utilizado no sistema, descrevendo suas principais etapas operacionais. Inicialmente, o controlador realiza a detecção da bateria, essencial para definir a tensão do sistema (12V ou 24V). Em seguida, ao receber energia do painel fotovoltaico, inicia-se o processo de carregamento.

Figura 28 - Fluxograma o funcionamento do Controlador de Carga



Fonte: Autoria própria (2025)

O controlador só ativa completamente sua interface e a lógica de carga após detectar uma bateria conectada, pois é a própria bateria que define a tensão do sistema, seja 12V ou 24V. Sem essa detecção inicial, o equipamento não liga apenas com a presença do painel fotovoltaico. Com relação à entrada fotovoltaica, o controlador aceita até 30V de tensão em circuito aberto quando configurado para sistemas de 12V e até 60V para sistemas de 24V.

O processo de carregamento segue etapas distintas conforme o tipo de bateria. Para baterias de chumbo, são utilizados três estágios: *Bulk*, *Boost* e *Float*. No estágio *Bulk*, toda a corrente disponível é enviada à bateria de forma rápida. Em seguida, no estágio *Boost*, a tensão atinge um valor específico, como 14,4V no caso de baterias LiFePO4 4S, sendo mantida constante para completar a carga. Por fim, o estágio *Float* reduz a tensão para valores como 13,8V, com o objetivo de evitar a sobrecarga. Já no caso de baterias de lítio, como a Li-Po 4S, o carregamento é feito em apenas dois estágios, *Bulk* e *Boost*, conforme especificado na página 18 do manual do controlador.

A presença ou ausência de entrada fotovoltaica é indicada por ícones no visor do controlador, representando sol cheio, meio sol ou ausência de entrada. Caso o painel não esteja gerando tensão suficiente, devido a fatores como sombra ou ângulo inadequado, o sistema exibe o ícone correspondente à falta de geração.

Segundo o manual do controlador de carga, alguns requisitos mínimos devem ser atendidos para garantir o funcionamento correto do sistema. O primeiro deles é a conexão da bateria. A tensão mínima da bateria deve ser de aproximadamente 9V, valor indicado como faixa inferior de operação no modo “USE”. Sem a bateria conectada, o controlador não liga nem opera, mesmo que o painel fotovoltaico esteja fornecendo energia.

Em relação à entrada de energia pelo painel fotovoltaico, há uma exigência de tensão mínima para que o carregamento da bateria seja iniciado. A tensão do painel deve ser superior à tensão da bateria em pelo menos 1 a 3 volts. Por exemplo, se a bateria estiver com carga de 13V, o painel deverá fornecer entre 14V e 15V para iniciar efetivamente o carregamento.

A faixa de entrada nominal recomendada para o funcionamento do algoritmo MPPT depende da configuração do sistema. Para sistemas de 12V, o controlador pode operar com tensões de entrada de até 30V, mas a tensão mínima eficaz para rastreamento e carregamento úteis deve ser superior a 15V. Embora não haja uma corrente mínima definida no manual, é necessário que o painel fotovoltaico gere uma potência útil mínima, estimada em torno de 1 a 2 amperes, para que o controlador atue de forma eficiente.

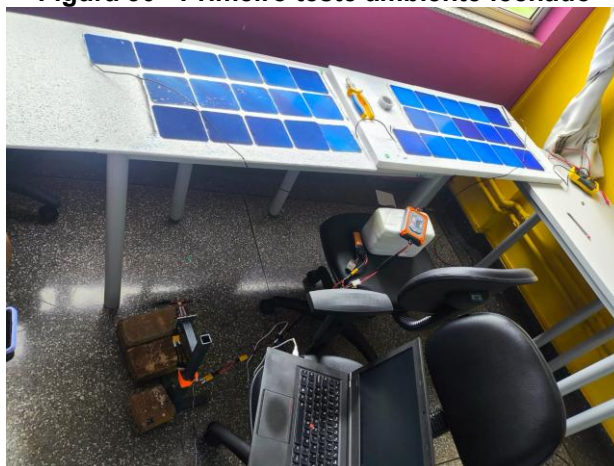
## **5.2 Simulação de Voo 1**

Para a realização dos testes de simulação de voo, foi desenvolvida uma base de suporte em bancada destinada à fixação segura do motor e dos demais componentes do sistema como representado na Figura 29. A estrutura, confeccionada em formato de “L” e com peso aproximado de 5 kg de ferro, proporcionou a estabilidade necessária para testar o funcionamento do conjunto propulsor em diferentes regimes de operação, sem riscos de deslocamento ou vibração excessiva.

**Figura 29 - Suporte para Teste de Bancada**

Fonte: Autoria própria (2025)

Essa abordagem permitiu simular, de forma controlada, os diferentes estágios do voo como subida, cruzeiro e descida utilizando comandos programados via Arduino, contribuindo significativamente para a análise do consumo energético e do comportamento dos componentes durante o funcionamento contínuo.

**Figura 30 - Primeiro teste ambiente fechado**

Fonte: Autoria própria (2025)

Os testes de simulação 1 realizado no dia 19 de maio as 14 horas em ambiente fechado operando com uma bateria LiPo 3S (tensão nominal de 11,1 V e carga total de 12,6 V) sem BMS, foi observada uma boa estabilidade de operação mesmo com o motor ligado em simulação de voo o controlador de carga mostrava uma pequena queda de tensão com o aumento da velocidade do motor.

A entrada proveniente do arranjo fotovoltaico indicava uma tensão de 19,52 V Circuito aberto e uma corrente de 3,49 A de curto-circuito. A irradiância solar medida no momento do teste, que chegou a aproximadamente 546 W/m<sup>2</sup> e sob condições parcialmente nubladas tivemos grandes variações.

**Figura 31 - Medições de irradiância solar, corrente e tensão durante a simulação em ambiente fechado**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Apesar da potência considerável fornecida pelo painel fotovoltaico, a corrente entregue à bateria foi de 1,1 A como apresentado na Figura 32, com uma tensão entre 12,7 e 12,3 V. Isso ocorreu enquanto o sistema alimentava simultaneamente o motor brushless simulado em voo. O comportamento registrado é coerente com o funcionamento de controladores MPPT, que ajustam a tensão e a corrente de saída conforme a demanda e o estado de carga da bateria. Como a bateria já se encontrava próxima da carga total, a corrente de carregamento foi naturalmente reduzida para proteger a integridade das células.

**Figura 32 - Corrente fornecida a bateria 3S**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Também foram observados comportamentos distintos quando utilizado em conjunto com baterias LiPo de diferentes configurações. Com uma bateria 4S de 5200mAh totalmente carregada (16,6 V) e entrada do painel fotovoltaico fornecendo aproximadamente 19 V de circuito aberto, o controlador apresentou falhas no funcionamento, entrando em modo de erro ou não iniciando corretamente o processo de carregamento. Esse comportamento contrasta com os testes realizados com uma bateria 3S (12,6 V) de 2200 mAh, nos quais o sistema funcionou normalmente, mantendo a carga e operando.

A análise sugere que a margem de tensão entre o painel fotovoltaico e a bateria 4S (apenas cerca de 2,4 V de diferença) pode ter sido insuficiente para o rastreamento eficaz do ponto de máxima potência, principalmente quando o sistema interpreta automaticamente a configuração como sendo de 24 V. Nessa condição, o controlador exige uma tensão de entrada painel fotovoltaico significativamente superior para operar corretamente, o que pode não ter sido atendido pelo arranjo fotovoltaico utilizado, levando o sistema ao modo de proteção, podemos concluir que uma string com 34S seria mais adequado a bateria 4S.

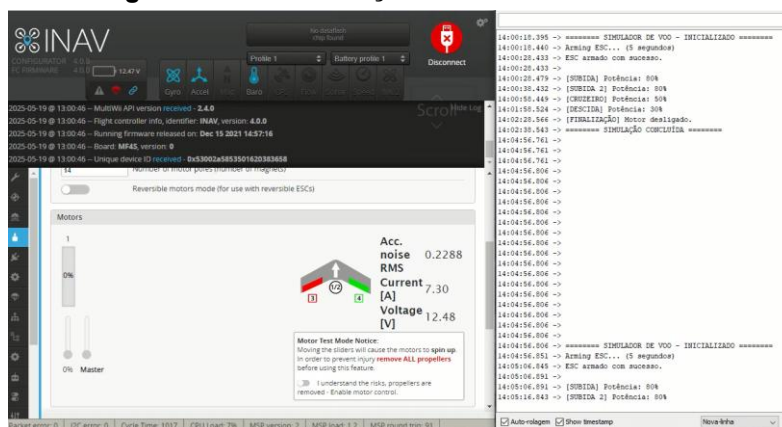
Além disso, observou-se que, mesmo com a bateria LiPo 3S completamente carregada, o controlador continuava a tentar fornecer corrente ao banco de baterias. Isso indica que o controlador atua apenas com base na tensão total do *pack*, sem considerar o estado individual de cada célula. Tal comportamento representa um risco, já que uma ou mais células podem ultrapassar o limite de 4,2 V, o que pode levar à degradação do conjunto ou até mesmo a situações perigosas, como inchaço ou combustão.

Com base na observação de que o controlador de carga continuava a fornecer corrente mesmo com a bateria LiPo 3S totalmente carregada sem considerar o estado individual das células, optou-se pela instalação de um sistema de gerenciamento de bateria (BMS) para a simulação de voo 2. Essa medida foi essencial para garantir maior segurança e confiabilidade ao sistema. O BMS passou a monitorar individualmente cada célula da bateria, ativando o balanceamento quando necessário e protegendo contra sobrecargas, descargas excessivas e correntes elevadas.

Com o controlador de voo Matek F405-Wing devidamente conectado à bateria e ao ESC, foi possível monitorar em tempo real, por meio do software INAV, os parâmetros de consumo do sistema durante a simulação dos três modos de voo



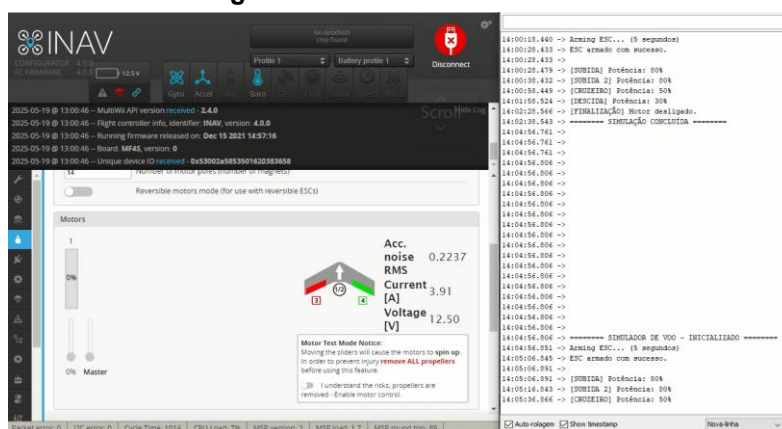
**Figura 34 – Estabilização subida motor em 80%**



Fonte: Autoria própria (2025)

No modo cruzeiro, com o motor estabilizado em 50% da potência, a corrente caiu para 3,91 A e a tensão se manteve próxima, em 12,50 V, indicando um consumo mais moderado e constante como apresentado na Figura 35.

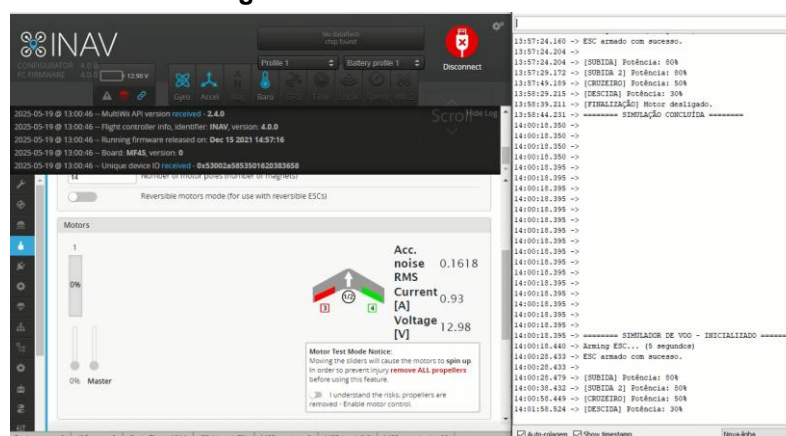
**Figura 35 - Modo Cruzeiro 50%**



Fonte: Autoria própria (2025)

Já na fase de descida, representada na Figura 36, com o motor operando a apenas 30% da potência, observou-se uma redução significativa na corrente para 0,91 A, acompanhada de um aumento na tensão para 12,98 V. Esse comportamento reflete a menor exigência energética típica dessa etapa final do voo, em que o esforço do sistema é consideravelmente reduzido.

Figura 36 - Modo descida 30%



Fonte: Autoria própria (2025)

Esses registros foram fundamentais para analisar o comportamento do sistema embarcado sob diferentes condições operacionais. Segue a Tabela 6 com os valores de tensão e corrente medidos nos respectivos modos de voo durante a simulação:

Tabela 6 - Dados da Simulação de voo 1

Modo de Voo	Corrente (A)	Tensão (V)
Acionamento do ESC	5,51	12,79
Subida (80%)	7,30	12,48
Cruzeiro (50%)	3,91	12,50
Descida (30%)	0,91	12,98

Fonte: Autoria própria (2025)

Essa tabela resume o comportamento elétrico do sistema durante os diferentes estágios da simulação, servindo como base para análise da autonomia e desempenho da bateria sob condições de voo simuladas.

É importante destacar que, nesse teste, a bateria havia sido previamente sobrecarregada devido ao carregamento direto pelo controlador de carga, sem o uso do BMS. Ao entrar no modo de subida. Esses dados foram registrados ao longo de uma simulação com duração total de 10 minutos onde ocorreu variações bruscas de velocidade o que foi corrigido para simulação 2 onde foi gerado um código com transições mais suaves consequentemente baixando os picos de corrente.

### 5.3 Simulação de Voo 2

O segundo teste de simulação de voo ao ar livre foi realizado em 25 de maio de 2025, nas áreas externas do campus Medianeira da UTFPR, com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema energético fotovoltaico em condições reais de irradiação. Utilizou-se uma bateria LiPo 4S com BMS instalado, visando garantir a proteção das células. No entanto, ao conectar a bateria totalmente carregada (16,8 V), o controlador de carga não reconheceu o sistema. Para contornar essa limitação do teste 1, a bateria foi descarregada previamente até 13,33 V, permitindo que o controlador funcionasse normalmente.

**Figura 37 - Foto tirada as 10h do dia da simulação 2**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

A montagem do sistema foi finalizada às 10h; entretanto, devido à cobertura de nuvens visível na Figura 35, o arranjo de 32 células em série gerava apenas 0,2 A. Essa baixa geração, registrada no visor do controlador de carga Figura 38, não foi suficiente para iniciar o carregamento da bateria.

**Figura 38 - Corrente Fornecida pelo painel fotovoltaico**

**Fonte: Aatoria própria (2025)**

Dessa forma, os testes foram retomados às 11h46, momento em que o painel fotovoltaico passou a apresentar uma tensão de 20,07 V em circuito aberto e uma corrente de curto-circuito de 4,76 A, conforme exibido na Figura 39. Essas condições permitiram ao controlador de carga fornecer uma saída estável de 14,62 V, viabilizando o funcionamento do sistema.

**Figura 39 - Medições de Corrente e tensão do painel**

a) Corrente de Curto Circuito

b) Tensão de Curcuito Aberto

**Fonte: Aatoria própria (2025)**

Por volta das 13 horas o céu estava limpo e o controlador de carga chegou a fornecer 4,4 A para a bateria como mostra a Figura 40.

**Figura 40 – Medição da corrente fornecida pelo painel**



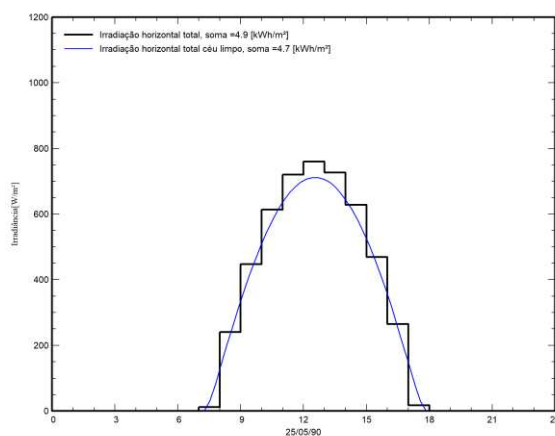
**Fonte: Autoria própria (2025)**

Para melhor compreensão das condições de irradiância e temperatura no dia analisado, as Figuras 41 e 42 apresentam, respectivamente, os gráficos de irradiância solar e variação de temperatura obtidos por meio do software PVsyst 8.0, utilizando a base de dados Meteonorm 8.2 para a região de Medianeira.

Na Figura 41, a curva azul, com formato suave e em sino, representa a irradiância horizontal total esperada para um dia com céu limpo, indicando o comportamento típico da radiação solar ao longo do dia. Já a Figura 42 mostra a variação aproximada da temperatura durante o mesmo período, permitindo uma análise mais completa das condições climáticas da simulação.

**Figura 41 – Gráfico de Irradiância solar**

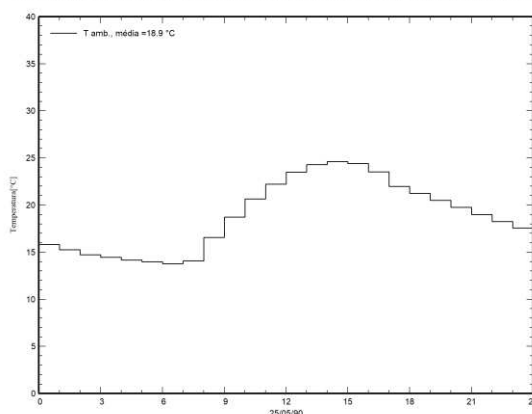
Meteorologia para Medianeira - Dados gerados de acordo com um modelo a partir de valores mensais.



**Fonte: Software PVsyst (2025)**

**Figura 42 - Gráfico de temperatura**

Meteorologia para Medianeira - Dados gerados de acordo com um modelo a partir de valores mensais.

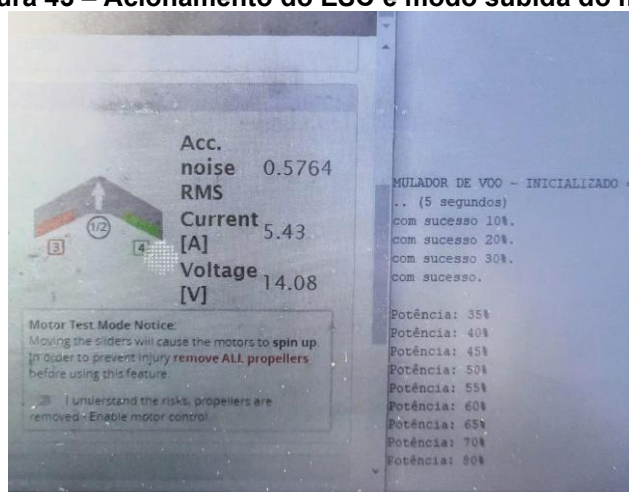
**Fonte: Software PVsyst (2025)**

Após a apresentação dos gráficos de irradiância e temperatura, é possível contextualizar as condições ambientais em que a Simulação de Voo 2 foi realizada. Essas variáveis influenciaram diretamente no desempenho do sistema fotovoltaico e na resposta elétrica do carregamento da bateria.

A seguir, serão apresentadas as imagens capturadas durante os testes, evidenciando o comportamento do sistema nos diferentes modos de voo, com foco nos valores de corrente e tensão registrados em cada etapa.

Durante a simulação, foram monitorados os valores de corrente e tensão do sistema em cada etapa do voo. No modo de subida, a potência foi aumentada de forma gradual até atingir 80%, evitando variações bruscas que poderiam acionar a proteção do BMS instalado. Nesse estágio, registrou-se uma corrente de pico de 5,43 A e uma tensão de 14,11 V, evidenciando o esforço energético necessário para sustentar essa fase do voo apresentados na Figura 43.

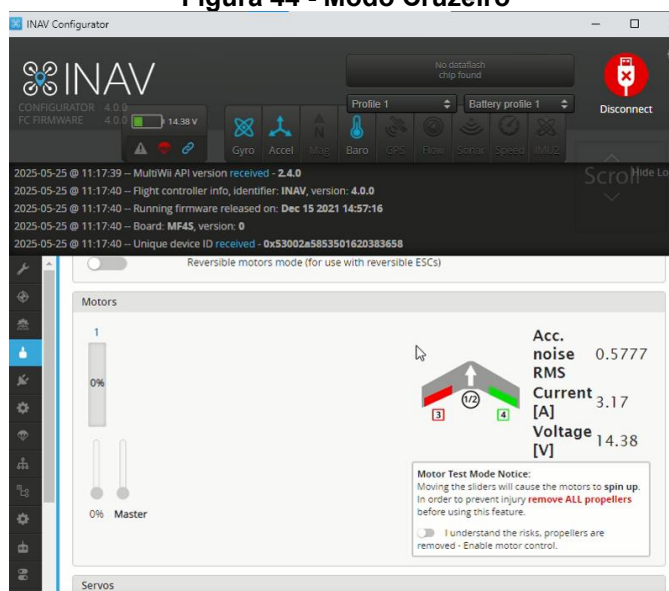
**Figura 43 – Acionamento do ESC e modo subida do motor**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

No modo cruzeiro, a potência foi estabilizada em aproximadamente 50%, com a corrente variando entre 2,55 A e 3,19 A e a tensão média mantendo-se em torno de 14,4 V, conforme evidenciado na Figura 44. Por volta do meio-dia, em razão das boas condições de irradiância, o controlador chegou a fornecer até 4,4 A para a bateria, demonstrando um desempenho eficiente do sistema nesse período.

**Figura 44 - Modo Cruzeiro**

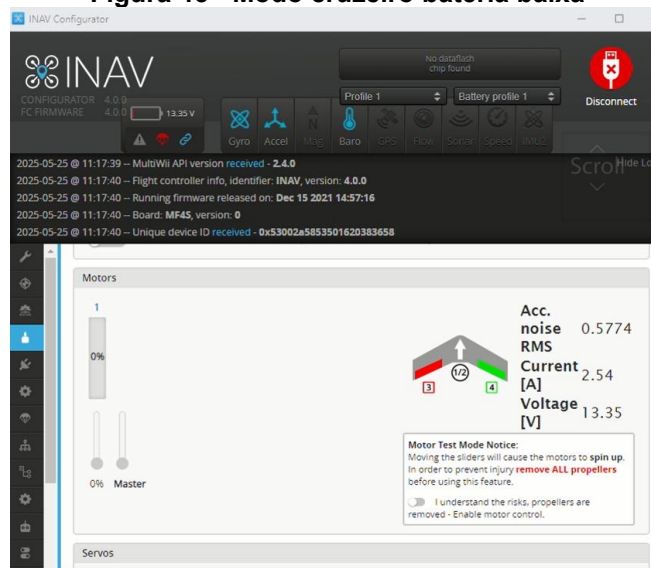


**Fonte: Autoria própria (2025)**

A partir das 14h12, foi detectado o início da descarga acentuada da bateria, cuja tensão reduziu-se rapidamente para 13,35 V, conforme ilustrado na Figura 45. Apesar

de a causa exata não ter sido identificada, essa queda foi suficiente para que o sistema interpretasse a condição como nível crítico de carga, ativando a proteção do BMS e iniciando automaticamente o modo de descida.

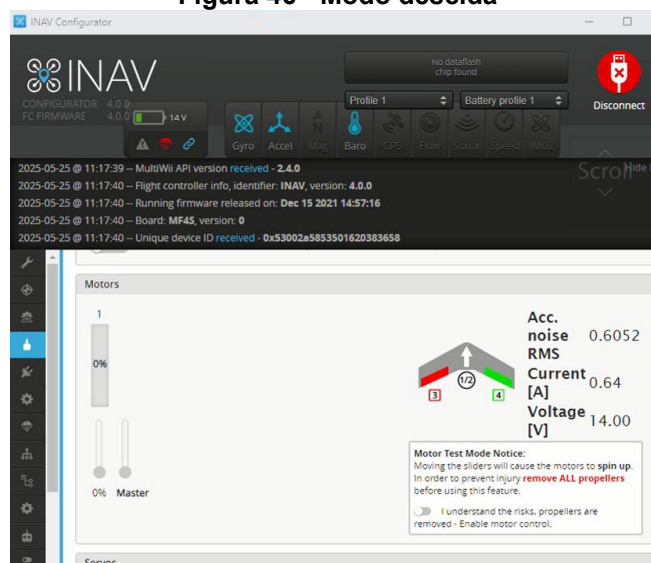
**Figura 45 - Modo cruzeiro bateria baixa**



Fonte: Autoria própria (2025)

Já na fase de descida e encerramento da simulação, a potência foi gradualmente reduzida até 10%, com corrente mínima de 0,64 A e tensão estabilizada em torno de 14 V como apresentado na Figura 46.

**Figura 46 - Modo descida**



Fonte: Autoria própria (2025)

Com base nas figuras e nas medições obtidas ao longo da simulação, foi possível observar o comportamento energético da aeronave em cada etapa do voo, evidenciando variações significativas de corrente e tensão conforme o perfil de potência aplicado ao motor. Os dados registrados demonstram que o sistema reagiu de maneira consistente às mudanças de carga, destacando a importância do controle gradual da potência para preservar a integridade do sistema elétrico, especialmente com o uso do BMS.

A Tabela 7 apresenta os dados registrados durante a simulação de voo realizada ao ar livre em 25 de maio de 2025, detalhando as variações de corrente, tensão e potência em cada etapa. Esses dados foram essenciais para avaliar o desempenho do sistema fotovoltaico integrado à aeronave em condições reais de operação.

**Tabela 7 - Dados da Simulação de voo 2**

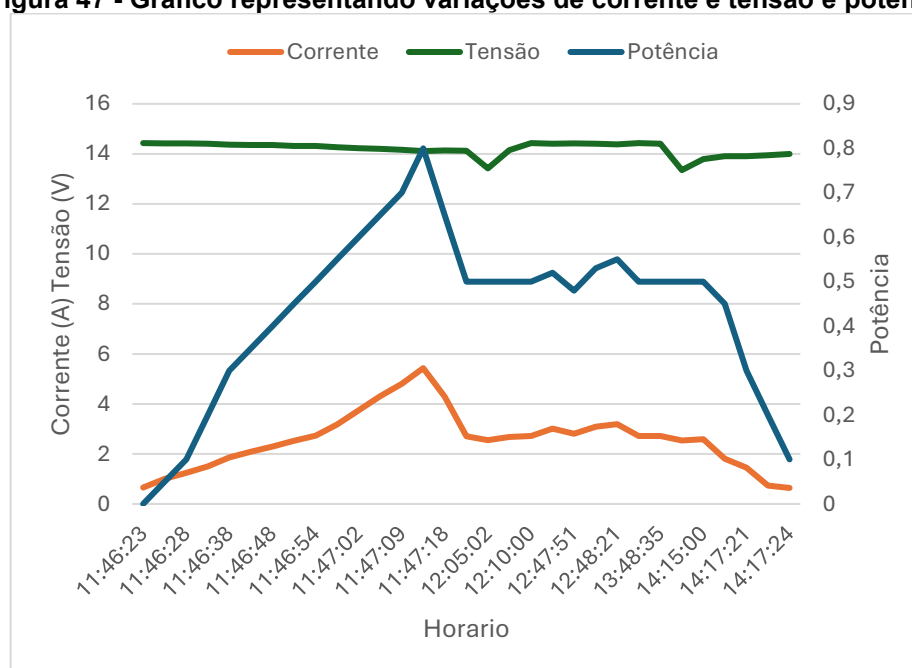
Modo de Voo	Tempo	Potência	Corrente	Tensão
SIMULADOR DE VOO - INICIALIZADO	11:46:23	0	0,65	14,43
Arming ESC... (5 segundos)	11:46:24	5%	1	14,42
ESC armado com sucesso 10%	11:46:28	10%	1,24	14,42
ESC armado com sucesso 20%	11:46:33	20%	1,5	14,4
ESC armado com sucesso 30%	11:46:38	30%	1,86	14,37
[SUBIDA 0] Potência: 35%	11:46:44	35%	2,09	14,36
[SUBIDA 1] Potência: 40%	11:46:48	40%	2,29	14,35
[SUBIDA 2] Potência: 45%	11:46:51	45%	2,52	14,32
[SUBIDA 3] Potência: 50%	11:46:54	50%	2,73	14,31
[SUBIDA 4] Potência: 55%	11:46:57	55%	3,18	14,27
[SUBIDA 5] Potência: 60%	11:47:02	60%	3,74	14,23
[SUBIDA 6] Potência: 65%	11:47:06	65%	4,31	14,2
[SUBIDA 7] Potência: 70%	11:47:09	70%	4,81	14,16
[SUBIDA 8] Potência: 80%	11:47:14	80%	5,43	14,11
[CRUZEIRO 1] Potência: 65%	11:47:18	65%	4,29	14,14
[CRUZEIRO 2] Potência: 50%	11:47:28	50%	2,7	14,12
[CRUZEIRO 2] Potência: 50%	12:05:02	50%	2,55	13,42
[CRUZEIRO 2] Potência: 50%	12:09:00	50%	2,68	14,15
[CRUZEIRO 2] Potência: 50%	12:10:00	50%	2,72	14,43
[CRUZEIRO 3] Potência: 52%	12:47:31	52%	3,01	14,41
[CRUZEIRO 4] Potência: 48%	12:47:51	48%	2,81	14,42
[CRUZEIRO 5] Potência: 53%	12:48:01	53%	3,09	14,4
[CRUZEIRO 6] Potência: 55%	12:48:21	55%	3,19	14,38
[CRUZEIRO 7] Potência: 50%	12:48:31	50%	2,72	14,43
[CRUZEIRO 8] Potência: 50%	13:48:35	50%	2,72	14,41
[CRUZEIRO 8] Potência: 50%	14:14:16	50%	2,54	13,35

[CRUZEIRO 8] Potência: 50%	14:15:00	50%	2,59	13,79
[DESCIDA 1] Potência: 45%	14:17:19	45%	1,81	13,9
[DESCIDA 2] Potência: 30%	14:17:21	30%	1,45	13,91
[DESCIDA 3] Potência: 20%	14:17:23	20%	0,73	13,95
[DESCIDA 4] Potência: 10%	14:17:24	10%	0,64	14,00

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 47 apresenta o gráfico com a relação entre as variáveis monitoradas, permitindo uma visualização mais clara do comportamento do sistema durante o teste. A simulação teve uma duração aproximada de 2 horas e 30 minutos.

Figura 47 - Gráfico representando variações de corrente e tensão e potência



Fonte: Autoria própria (2025)

Com base nos dados obtidos durante a Simulação de Voo 2, observou-se que a bateria se manteve carregada com tensão em torno de 14,4 V, conforme especificado no manual do controlador de carga. No entanto, nos minutos finais da simulação, ocorreu uma queda repentina de tensão, resultando no descarregamento da bateria e consequente desligamento do sistema.

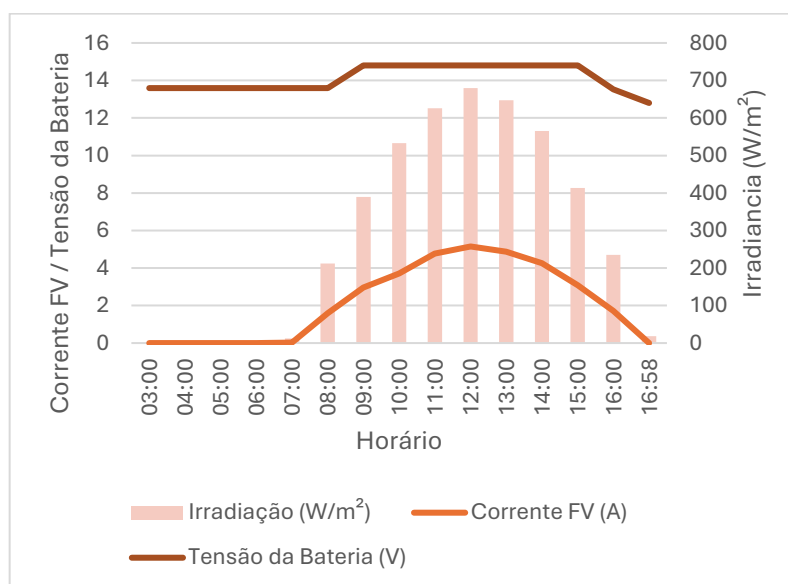
**Figura 48 - Foto tirada no dia do teste 2**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

A Figura 47 apresenta o gráfico construído com base em dados horários de irradiância solar e temperatura ambiente ao longo do dia da simulação. Esses dados foram integrados às características elétricas da bateria utilizada e ao consumo constante do motor, representando uma operação em modo de cruzeiro com corrente fixa de 3 A.

**Figura 49 - Irradiância, Corrente FV e Tensão da Bateria em Condição Simulada com Carga de 3 A**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Para realizar essa análise, foi desenvolvido um código no software MATLAB®, que estimou a corrente gerada pelo painel fotovoltaico em função da irradiância disponível e do comportamento elétrico das células ao longo do tempo. Os dados

simulados foram organizados em planilhas do Microsoft Excel®, possibilitando a construção do gráfico que reúne, em uma mesma visualização, as curvas de irradiância ( $W/m^2$ ), corrente gerada (A) e tensão da bateria (V).

O objetivo principal desta simulação foi avaliar se a energia gerada pelos painéis seria suficiente para manter a bateria carregada e garantir o funcionamento contínuo do motor durante o dia. A análise dos resultados, portanto, contribui para verificar a viabilidade energética do sistema em condições reais de operação.

Com base nos dados simulados da simulação computacional, observa-se que, considerando o início do voo às 10h00, a bateria se manteria carregada até aproximadamente às 16h00. A partir desse horário, a corrente gerada pelos painéis fotovoltaicos não seria mais suficiente para sustentar o carregamento da bateria, que passaria a operar apenas com a energia armazenada até sua descarga completa. Esse cenário indica um tempo estimado de voo de cerca de 6 horas e 58 minutos. Vale ressaltar que a análise desconsidera fatores reais como a presença de nuvens, sombras ou variações bruscas de irradiância.

Esses resultados demonstram que o sistema fotovoltaico foi capaz de suprir a demanda energética do motor durante todas as fases previstas de voo, mesmo diante das oscilações na irradiância solar. A simulação reforça a viabilidade da proposta de estender a autonomia da aeronave por meio da geração embarcada de energia, evidenciando ainda a importância de um dimensionamento adequado dos painéis e do uso de um BMS para garantir segurança e estabilidade operacional.

Comparando os dois cenários, nota-se que os valores simulados se alinham de forma consistente com os dados reais, validando o modelo matemático utilizado. No entanto, a simulação apresentou um tempo de autonomia levemente superior ao registrado nos testes práticos. Essa diferença pode ser atribuída à idealização do modelo, que não considerou variações ambientais reais como presença de nuvens, sombreamento e possíveis perdas por aquecimento.

Ainda assim, a simulação se mostrou uma ferramenta eficaz para prever o comportamento do sistema, contribuindo para o dimensionamento adequado do arranjo fotovoltaico e reforçando a viabilidade do uso de geração fotovoltaica embarcada para ampliar a autonomia de RPAs de asa fixa.

## 6 CONCLUSÕES

Embora o aeromodelo não tenha sido construído fisicamente, foram conduzidos testes de bancada e simulações de voo que permitiram avaliar o desempenho do sistema elétrico em diferentes condições. Esses testes abrangeram medições reais de corrente, tensão e irradiância solar, além da simulação do comportamento do motor nas três principais fases de voo: subida, cruzeiro e descida.

A partir das análises, verificou-se que arranjos com menos de 16 células fotovoltaicas não atingem a tensão mínima necessária para acionar corretamente o controlador de carga MPPT. Entre os arranjos avaliados, a configuração com 32 células em série demonstrou ser a mais eficiente para sistemas com bateria LiPo 3S, enquanto para baterias 4S, a ligação com 34 células se mostra uma melhor opção. As medições em campo confirmaram que a eficiência da geração fotovoltaico está diretamente relacionada à irradiância disponível, sendo essencial o correto dimensionamento do sistema para assegurar o carregamento durante o voo.

Durante a simulação de voo, foi possível observar o comportamento dinâmico do consumo elétrico do sistema, com variações de corrente e tensão de acordo com o regime de operação do motor. A instalação de um sistema BMS foi crucial para proteger as células da bateria contra sobrecargas, dado que o controlador de carga operava com base apenas na tensão total do pack. Esse ajuste aumentou significativamente a segurança e a confiabilidade do sistema.

Portanto, este trabalho conclui que é viável integrar painéis fotovoltaicos em RPAs de asa fixa para prolongar a autonomia de voo, desde que a configuração dos painéis e o dimensionamento dos componentes estejam adequadamente ajustados.

Os resultados obtidos oferecem subsídios técnicos relevantes para o desenvolvimento de aeronaves autossustentáveis, podendo ser aplicados em futuras pesquisas ou projetos que envolvam operações aéreas prolongadas em ambientes remotos.

## REFERÊNCIAS

- RCTESTFLIGHT. **RC Solar Plane Flight Duration Test**. [S.l.]: YouTube, 2022. Disponível em: <https://youtu.be/1OGrDvInUAY>. Acesso em: 22 maio 2025.
- ANDERSON JR., J. D. **Introduction to Flight**. 8. ed. Nova York: McGraw Hill Education, 2014. p. 294–296.
- BAHABRY, Ahmed; WAN, Xiangpeng; GHAZZAI, Hakim; MENOVAR, Hamid; VESONDER, Gregg; MASSOUD, Yehia. **Low-altitude navigation for multi-rotor drones in urban areas**. IEEE Access, v. 7, p. 87716–87731, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2925531.
- BRASIL. Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986. **Código Brasileiro de Aeronáutica**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 dez. 1986. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l7565.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7565.htm). Acesso em: 03 nov. 2024.
- CALIXTO, Felipe. **História dos drones: como surgiram? Para que servem?**. Itarc, s.d. Disponível em: <https://itarc.org/historia-dos-drones/>. Acesso em: 22 nov.2024.
- CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Alternativas Energéticas: uma visão Cemig**. Belo Horizonte: CEMIG, 2012.
- CELESTINO, Paulo. **As lanças do futuro**. Revista Asas: Revista de cultura e história da aviação, São Paulo, v. 19, 2004.
- DEEPIKA, M.; KARTHIKEYAN, P.; KEERTHANA, A. V.; LAKSHMANAN, M.; GOWTHAM, P.; KUMAR, C.; JAISIVA, S. **MPPT-Based Charge Controller for Battery Fast Charging**. Department of Electrical and Electronics Engineering, M. Kumarasamy College of Engineering, Karur, Índia, 2023.
- DILEEP, M. R. **A study and analysis on various types of agricultural drones and its applications**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Mestrado em Computação) – Nitte Meenakshi Institute of Technology, Bengaluru, Índia, 2020.
- DOBRZAŃSKI, L. A.; DRYGAŁA, A.; GIEDROĆ, M.; MACEK, M. **Monocrystalline silicon solar cells applied in photovoltaic system**. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, v. 53, n. 1, p. 1–12, jul. 2012. Acesso em: 19 nov. 2024.
- AUSONIO, Elena; BAGNERINI, Patrícia; GHIO, Marco. **Enxames de drones em atividades de supressão de incêndios: uma estrutura conceitual**. Drones, Basel, v. 5, n. 1, p. 17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones5010017>. Acesso em: 03 out. 2024.
- FRANCHI, A.; MALLET, A. **Adaptive Closed-Loop Speed Control of BLDC Motors with Applications to Multi-Rotor Aerial Vehicles**. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017.

JORGE, L. A. de C.; INAMASU, Ricardo Y. **Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão**. Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico (ALICE), 2014. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 28 out. 2024.

KIM, Seon Jin; LIM, Gino J.; AHAMADIAN, Navid; TORABBEIGI, Maryam. **A Rescheduling Method of Drone Flights under Insufficient Remaining Battery Duration**. Em: 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Dallas, TX, EUA, 12 a 15 de junho de 2018. IEEE, 2018. p. 468–472. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/>. Acesso em: 22 out. 2024.

K M. Trevizani. **Uma Extensão do Sistema de Telemetria e Telecomandos do Projeto ARARA para Transmissão Digital de Vídeo e Dados**, abril de 2002.

KOMP, R. J. **Practical photovoltaics: electricity from solar cells**. 3. ed. Ann Arbor: AATEC Publications, 2001.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. **Células solares: uma revisão**. Rev. Virtual Quim., v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015.

MCCORMICK, B. W. **Aerodynamic of V/STOL Flight**. Nova York: Dover, 1999.

MEDEIROS, Fabrício Ardais. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Rio Grande do Sul, 2007.

NUNES, Charles Eduardo Duarte. **Teoria sobre helicóptero**. Hangarmma. Disponível em: <https://hangarmma.com.br/blog/teoria-sobre-helicoptero/>. Acesso em: 21 nov. 2024.

OETTERSHAGEN, Philipp; SCHLUMPF, Christian; JABAS, Michael; et al. **Perpetual flight with a small solar-powered UAV: Flight results, performance analysis and model validation**. IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2016. p. 1–8. DOI: 10.1109/AERO.2016.7500855.

PERDANA, A. Y. **Analisis Efisiensi Solar Charge Controller Tipe PWM dan MPPT Dengan Metode Simulasi**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Sistemas de Energia Solar) - Universitas Negeri Semarang, Semarang, 2019.

PERES, Hugo Freitas. **Desenvolvimento de veículos aéreos não tripulados no Brasil: interesses nacionais, desafios internacionais**. Rev. Conj. Aust., Porto Alegre, v. 6, n. 31, p. 29–41, ago./set. 2015. ISSN: 2178-8839.

PINTO JÚNIOR, Jonas Vicente. **Simulação do limiar de percolação elétrico de células orgânicas de polímero/nanotubos de carbono para aplicação em células fotovoltaicas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

RASI, J. R. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em pulverização agrícola**. 2008. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Rural) -Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

RENNER, L. C.; SILVA, T. S.; MENDES JÚNIOR, C. W.; WIEBBELLING, R. **Desenvolvimento e montagem de VANT de asa fixa de baixo custo para suprir a demanda de ensino e pesquisa nas Geociências**. *Terræ Didatica*, Campinas, SP, v. 16, p. 1–12, 2020.

SCHEIMAN, D. **A Path Toward Enhanced Endurance of a UAV Using IMM Solar Cells**. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 2016 IEEE 43rd, 2016.

SCHEIMAN, David; HOHEISEL, Raymond; EDWARDS, Daniel J.; PAULSEN, Andrew; LORENTZEN, Justin; JENKINS, Phillip; CARUTHERS, Steve; CARTER, Sam; WALTERS, Robert. **A path toward enhanced endurance of a UAV using IMM solar cells**. 2016. 6 p. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7461234>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SEEWALD, Adam; MARINA, Hector Garcia de; MIDTIBY, Henrik Skov; SCHULTZ, Ulrik Pagh. **Mechanical and Computational Energy Estimation of a Fixed-Wing Drone**. Em: 2020 Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). 2020. p. 135–142. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/>. Acesso em: 29 out. 2024.

SILVA, Jean Carlos Inácio da. **Efeitos do uso de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA/drone) na vigilância e coleta de imagens para produção de conhecimento no campo da Inteligência de Segurança Pública**. 2018. Monografia (Especialização em Segurança Pública) – Academia de Polícia Militar, Belo Horizonte, 2018.

SINEGLAZOV, V. M.; KARABETSKY, D. P. **Energy system design of solar aircraft**. In: **IEEE 2nd International Conference “Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments**, 2013, Kyiv, Ucrânia. Anais... [S.l.: s.n.], 2013. p. 9–11. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6705267>. Acesso em: 4 nov. 2024.

SINGH, A. K.; AGRAWAL, A. K.; VOHRA, S.; THAKUR, S. S.; PATEL, G. **Solar Charge Controller**. *International Journal of Academic Research and Development*, v. 2, n. 6, p. 994–1001, 2017.

TREVIZANI, K. M. **Uma Extensão do Sistema de Telemetria e Telecomandos do Projeto ARARA para Transmissão Digital de Vídeo e Dados**, abril de 2002.

VERMA, Ashu; KAPOOR, S. R. **A Review of Solar based Inverters using PWM Techniques**. *International Journal of Research in Electronics and Computer Engineering*, v. 7, n. 2, jun. 2019.

ZALUDIN, J.; HARITUDDIN, A. **Design and Analysis of Solar-Powered Fixed-Wing UAV with Improved Endurance**. *International Journal of Sustainable Aviation*, v. 5, n. 1, p. 25–33, 2019.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, [2012].

SUNPOWER CORPORATION. **SunPower Maxeon C60 solar cell datasheet**. San Jose: SunPower, 2023. 2 p.

Moraes, Caio. **Célula fotovoltaica: Tudo que você precisa saber**. In: Eletrônica de Potência. [S.l.]: [s.n.], 2023. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>. Acesso em: 17 maio 2025.

MORAIS, Otávio Augusto Martins. **Análise da variação da potência do arranjo fotovoltaico para operação de um inversor projetado**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2022.