

## DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM ALGORITMO PARA SIMULAÇÃO DE AUMENTO DA AUTONOMIA EM DRONES COM ENERGIA SOLAR

### *DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF AN ALGORITHM FOR SIMULATING INCREASED AUTONOMY IN SOLAR- POWERED DRONES*

Arthur Frade Polilo<sup>1</sup>  
Thais Santos Castro<sup>2</sup>

**Resumo** – O trabalho teve como objetivo analisar o aumento da autonomia de drones, os quais têm sido amplamente empregados em diversas áreas, como busca e salvamento, entrega de produtos, monitoramento agrícola, vigilância e segurança de perímetros, entre outras. Ao longo do estudo, buscou-se identificar o ponto de equilíbrio entre a adição de células solares à estrutura do drone e o ganho efetivo de autonomia, considerando as principais tecnologias fotovoltaicas disponíveis atualmente no mercado: silício monocristalino e policristalino, CIGS, CdTe e perovskita. Para isso, desenvolveu-se um programa computacional em Python capaz de simular o acréscimo esperado no tempo de voo de um drone de pequeno ou médio porte a partir de seus dados técnicos e das características da célula fotovoltaica incorporada à fuselagem. Os resultados obtidos mostraram que o aumento simulado na autonomia se aproximou de valores reais, apresentando incrementos no tempo de voo compatíveis com os relatados por outros autores em estudos semelhantes.

**Palavras-chave:** Células-solares. Drone. Programa em python.

**Abstract** - The objective of this study was to analyze the increase in drone autonomy, as these vehicles have been widely employed in various fields such as search and rescue, product delivery, agricultural monitoring, perimeter surveillance, and security, among others. Throughout the research, efforts were directed toward identifying the optimal balance between incorporating solar cells into the drone's structure and achieving an effective gain in flight endurance, considering the main photovoltaic technologies currently available on the market: monocrystalline and polycrystalline silicon, CIGS, CdTe, and perovskite. To this end, a computational program was developed in Python capable of simulating the expected increase in flight time for small- and medium-sized drones based on their technical specifications and the characteristics of the photovoltaic cell integrated into the fuselage. The results obtained

<sup>1</sup> Discente em Bacharelado de Engenharia de Elétrica na Universidade Estadual Paulista (UNESP). Contato: [arthur.frade@unesp.br](mailto:arthur.frade@unesp.br).

<sup>2</sup> Doutora em Engenharia Mecânica na área de Energia (UNESP/Guaratinguetá); Docente na Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Guaratinguetá-SP. Contato: [thais.castro@unesp.br](mailto:thais.castro@unesp.br)

*demonstrated that the simulated gains in autonomy closely matched real-world values, showing increases in flight duration consistent with those reported by other authors in similar studies..*

**Keywords:** *Solar cells. Drone. Python program.*

## I. INTRODUÇÃO

Registros históricos indicam que o surgimento dos drones, ou veículos aéreos não tripulados (VANTs), remonta ao início do século XX. Sua concepção inicial teve fins estritamente militares: ainda durante a Primeira Guerra Mundial, aeronaves controladas remotamente foram desenvolvidas para treinamento e para testes envolvendo o lançamento de bombas a uma distância segura, reduzindo os riscos aos tripulantes (DJI, 2024).

Com o passar das décadas, os drones passaram por significativas transformações em seu projeto estrutural, buscando-se reduzir peso, melhorar a aerodinâmica, aumentar a autonomia e diminuir a quantidade de operadores necessária para sua pilotagem. Até a década de 1970, sistemas que antes exigiam pelo menos 30 operadores passaram a demandar apenas três, resultado do trabalho do engenheiro Abraham Karem, cujo protótipo ficou conhecido como Albatross (DJI, 2024).

O avanço tecnológico das últimas décadas permitiu que os drones se tornassem mais simples, acessíveis e fáceis de operar, ampliando seu uso para além do contexto militar. Assim, consolidaram-se aplicações nas áreas de agricultura, monitoramento ambiental, vigilância de fronteiras, inspeção industrial, entre outras.

Apesar desses avanços, o aumento da autonomia de voo continua sendo um desafio relevante. Diversas instituições têm investigado novas abordagens para ampliar o tempo de operação dos drones, mantendo ao mesmo tempo estabilidade, peso reduzido e desempenho aerodinâmico adequado. Nesse contexto se insere o objetivo deste artigo: por meio do desenvolvimento de um programa em Python, foram analisadas variáveis relacionadas às características do drone e de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas. O modelo incorpora parâmetros como dimensões, eficiência, peso, área ocupada e demais propriedades de cada célula, a fim de estimar o ganho potencial de autonomia. As tecnologias estudadas incluem células de filme fino (flexíveis), perovskita, CIGS, silício monocristalino, silício policristalino e CdTe.

## II. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo combina abordagens quantitativa, qualitativa e computacional, com o objetivo de avaliar o impacto da integração de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas na autonomia de voo de um drone de pequeno/médio porte. A metodologia foi dividida em 5 pontos principais.

### *2.1 Revisão da Literatura e Análise Bibliométrica*

Foi conduzida uma revisão sistemática seguindo o protocolo PRISMA. A pergunta de pesquisa foi estruturada pela metodologia PICO. Utilizou-se o software VOSviewer para análise bibliométrica e identificação de tendências sobre células fotovoltaicas aplicadas a VANTs.

## *2.2. Seleção das Tecnologias Fotovoltaicas*

Foram selecionadas as tecnologias: silício mono e policristalino, CIGS, CdTe e perovskita. Consideraram-se eficiência máxima, densidade de massa, estabilidade, custo e degradação anual.

## *2.3. Caracterização do Drone e Condições de Operação*

Definiu-se um drone de asa fixa de 2 kg, área útil de 0,2 m<sup>2</sup> e consumo médio de 100 W. A irradiância típica da região Nordeste (5,69 kWh/m<sup>2</sup>/dia) foi convertida para 1140 W/m<sup>2</sup> no período de pico solar.

## *2.4. Desenvolvimento do Algoritmo em Python*

Foi criado um algoritmo em Python 3.8 com equações de irradiância efetiva, potência captada, massa adicional, penalidades aerodinâmicas e estimativa do tempo extra de voo. Um módulo adicional calcula o tempo de recarga da bateria no solo

## *2.2. Validação dos Resultados*

Os resultados foram comparados com trabalhos como Schmidt et al. (2016) e Qinling & Jian (2013), apresentando boa concordância.

# III. RESULTADOS

## *3.1 Revisão da Literatura e Análise Bibliométrica*

A revisão sistemática da literatura foi conduzida seguindo o protocolo PRISMA, com o objetivo de assegurar transparência, rastreabilidade e reprodutibilidade do processo. A pergunta de pesquisa foi estruturada com base na metodologia PICO (População, Intervenção, Comparação e Desfecho), permitindo definir de forma precisa os elementos centrais da investigação. A plataforma Parsifal foi utilizada para organizar as etapas da revisão, incluindo a definição dos critérios de inclusão e exclusão, a formulação das perguntas orientadoras e a elaboração da string de busca. Todo o procedimento foi realizado em língua inglesa, visando compatibilidade com a ferramenta web.

As perguntas norteadoras da revisão foram:

- Quais equações relacionam o equilíbrio entre o número de células inseridas e o peso adicional do sistema?
- Quais tipos de células solares são mais adequados para cada configuração de drone?
- Qual é a viabilidade de utilizar energia solar como principal fonte de energia para drones?
- Qual modelo de drone apresenta melhor adequação para a implementação de células fotovoltaicas?
- A adição dessas células compromete significativamente a aerodinâmica?
- As células fotovoltaicas apresentam durabilidade suficiente para operação prolongada?

A busca sistemática foi realizada na base de dados Web of Science, utilizando a seguinte string de busca:

("photovoltaic cell\*" OR "solar cell\*" OR "PV cell\*") AND (drone\* OR "UAV" OR "unmanned aerial vehicle\*" OR "fixed-wing\*") AND ("autonom\*" OR "endurance" OR "flight time") AND ("weight" OR "payload" OR "power-to-weight ratio" OR "energy

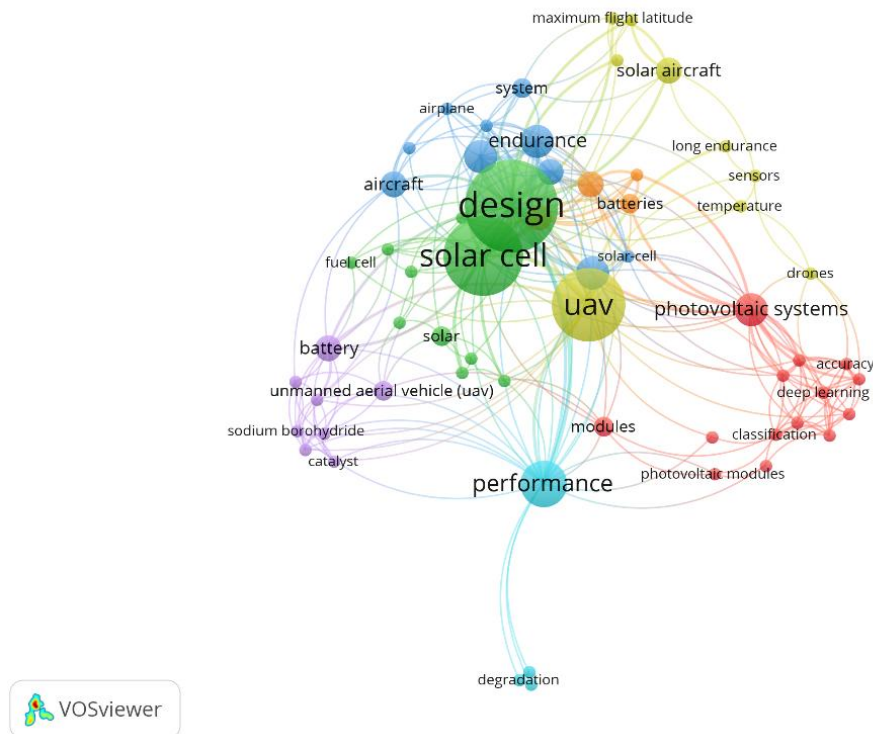
efficiency") AND ("mathematical model\*" OR "equation\*" OR "optimization" OR "feasibility analysis").

Essa estratégia permitiu identificar publicações altamente alinhadas ao escopo deste estudo, garantindo uma seleção precisa e relevante das evidências disponíveis.

Para complementar a revisão, realizou-se uma análise bibliométrica por meio do software VOSviewer, a fim de identificar tendências, redes de colaboração e a distribuição geográfica das pesquisas relacionadas à aplicação de células fotovoltaicas em drones. Os metadados das referências selecionadas foram importados para o software, possibilitando a geração de mapas de visualização.

A Figura 1 apresenta o mapa de coocorrência das palavras-chave mais prevalentes nos estudos analisados, evidenciando os principais termos relacionados ao tema e a intensidade das conexões entre eles.

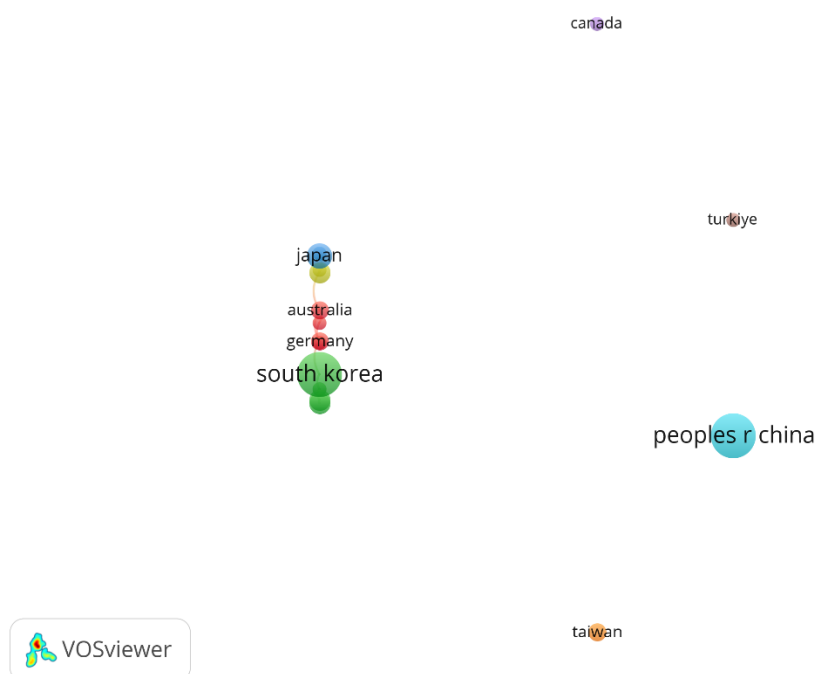
Figura 1 – Mapa de coocorrência de palavras-chave



Fonte: autoral

Na Figura 2 é mostrado a rede de colaboração entre países, indicando quais nações têm maior representatividade nas pesquisas sobre a aplicação de células fotovoltaicas em veículos aéreos não tripulados.

Figura 2 – Mapa de colaboração entre países



Fonte: autoral

Esses resultados reforçam a relevância do tema no cenário internacional, destacando áreas de maior concentração científica e possíveis oportunidades para futuras investigações.

### 3.2 Seleção das Tecnologias Fotovoltaicas

Com o objetivo de corroborar os resultados encontrados na literatura, foi conduzida uma análise das principais equações utilizadas para estimar o desempenho energético das diferentes tecnologias de células fotovoltaicas avaliadas — perovskita, CIGS, CdTe e silício monocristalino e policristalino. Essas equações servem como base para verificar se a energia gerada por tais células seria suficiente para proporcionar um aumento significativo na autonomia de voo dos drones.

Cabe destacar que essas formulações representam apenas uma estimativa simplificada do comportamento do sistema durante operações diurnas. Para resultados mais precisos, seriam necessárias modelagens e simulações mais detalhadas, incorporando parâmetros como variação da eficiência com a temperatura, perdas elétricas nos cabos, efeitos aerodinâmicos adicionais e comportamento real da irradiância ao longo do dia.

### 3.2 Caracterização do Drone e Condições de Operação

Para a realização das estimativas, considerou-se um drone do tipo asa fixa, com massa total de 2 kg e área útil disponível de 0,2 m<sup>2</sup> na fuselagem para a instalação das células fotovoltaicas. Adotou-se como referência a irradiância solar média de 5,69 kWh/m<sup>2</sup>·dia, valor típico do Nordeste brasileiro segundo o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (PINHO; GALDINO, 2014). Com base nos

datasheets dos fabricantes, foram obtidos também os valores de massa específica das tecnologias fotovoltaicas avaliadas.

Para converter a irradiância diária para uma irradiância horária aproximada, o valor de 5,69 kWh/m<sup>2</sup>·dia foi dividido pelo intervalo correspondente ao período de maior disponibilidade solar, das 9h às 14h (ISMAË, 2022), totalizando aproximadamente cinco horas. Esse procedimento resultou em uma irradiância média de cerca de 1140 W/m<sup>2</sup>, que foi adotada como valor constante ao longo desse intervalo, por representar o período mais favorável para a operação de sistemas fotovoltaicos embarcados.

### 3.3 Desenvolvimento do Algoritmo em Python

Para dar suporte às estimativas de desempenho, foi desenvolvido um algoritmo em Python (versão 3.8) capaz de receber como entrada os parâmetros ambientais e estruturais do drone e, a partir disso, calcular o ganho esperado de autonomia. As principais equações utilizadas no programa são apresentadas nas equações de (1) a (3), aborda em Pinho; Galdino (2014).

O algoritmo estima inicialmente a potência fotogerada com base na irradiância solar incidente ( $G$ ), no ângulo de incidência ( $\beta$ ), nas perdas por sombreamento ( $f$ ), na área ocupada pelas células ( $S$ ) e na eficiência do módulo ( $\eta$ ). A Equação (1) expressa a irradiância efetiva incidente sobre a superfície fotovoltaica:

$$G_{ef} = G * \cos(\beta) * f \quad (1)$$

onde:

- $\beta$  é o ângulo de incidência da radiação solar ( $\beta = 0^\circ$  indica incidência perpendicular e captação máxima);
- $f$  representa perdas por sombreamento, sujeira e reflexão (0–1, sendo 1 ausência de perdas).

Embora esse valor tenha sido previamente determinado, ele foi incluído no programa para permitir simulações em diferentes locais e condições climáticas definidas pelo usuário.

A Equação (2) calcula a potência total potencialmente captada pelas células fotovoltaicas instaladas na fuselagem:

$$P_{cap} = G_{ef} * S * \eta \quad (2)$$

onde:

- $S$  é a área útil ocupada pelas células (m<sup>2</sup>),
- $\eta$  é a eficiência do módulo fotovoltaico.

O peso adicional introduzido pelas células instaladas no drone foi calculado conforme a Equação (3), onde a massa adicionada corresponde ao produto entre a densidade de massa da célula (kg/m<sup>2</sup>) e a área aplicada:

$$peso_{extra} = peso_{painel} * S \quad (3)$$

Esse valor é essencial, pois impacta diretamente o consumo energético do drone durante o voo.

Além dessas equações, o algoritmo incorpora diversos fatores que influenciam o desempenho real do sistema (PINHO; GALDINO, 2014), tais como:

- Fator de temperatura (0,85);
- Eficiência do mppt (0,90);
- Fator aerodinâmico (1,05), representando aumento do arrasto devido à instalação das células;
- Perdas por sombreamento e reflexão;
- Eficiência do módulo fotovoltaico;
- Potência média consumida pelo drone;
- Peso adicional das células;
- Autonomia base do drone.

Esses parâmetros foram incluídos para evitar superestimações e fornecer resultados mais próximos do comportamento real de voo. Todos podem ser ajustados pelo usuário, adaptando o algoritmo a diferentes cenários ou configurações.

A partir dessas variáveis, foi possível estimar o aumento da autonomia, em minutos, proporcionado pelas diferentes tecnologias fotovoltaicas. Os resultados demonstraram boa concordância com valores reportados em estudos anteriores, indicando que o algoritmo apresenta precisão satisfatória.

Como extensão final, foi incorporado ao programa um módulo para cálculo do tempo de recarga da bateria em solo utilizando energia solar. Tal funcionalidade permite simular operações quase autossustentáveis em energia, nas quais o drone pousa, recarrega-se via irradiância solar e pode retornar ao voo após restabelecer carga suficiente.

### *3.3.1 Condições iniciais consideradas no algoritmo*

Para a simulação dos resultados apresentados neste estudo, adotaram-se os seguintes valores:

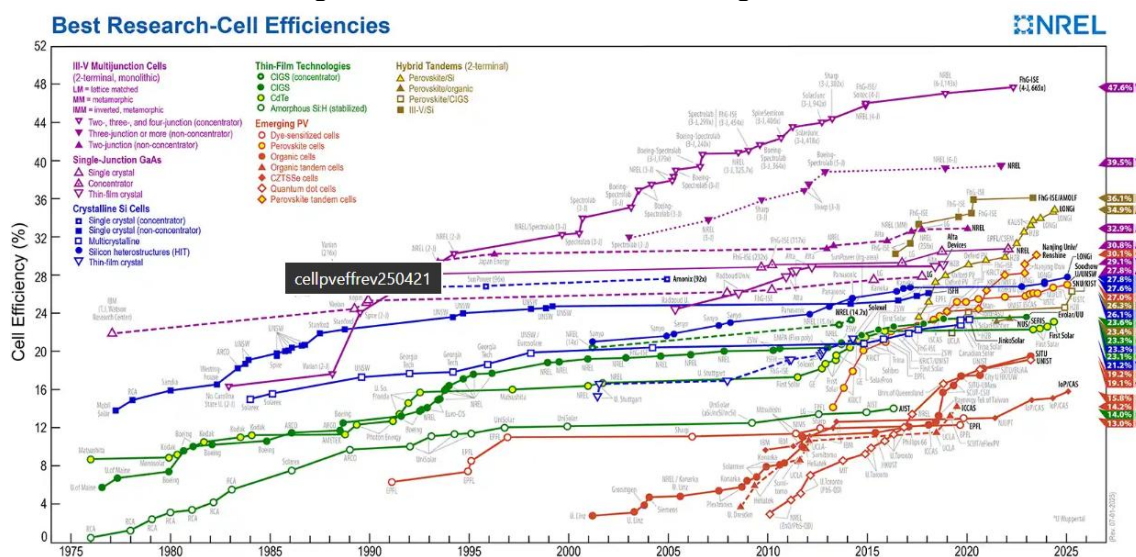
- Irradiância: 1140 W/m<sup>2</sup>
- Ângulo de incidência: 0°
- Fator de sombreamento/reflexão: 0,9
- Área ocupada pelo painel: 0,20 m<sup>2</sup>
- Eficiência do módulo ( $\eta$ ): valores de laboratório para cada tecnologia
- Potência média consumida pelo drone: 100 W
- Autonomia base sem painel: 60 min
- Peso das células (por unidade): Silício monocristalino/policristalino: 13 g (PICKEREL, 2019); CIGS: 2 g (JO, 2025) (VICTOR *et al.*, 2018); CdTe: 1

g (PARATHRAJU; UMASANKAR, 2025); Perovskita: 5 mg (KALTENBRUNNER *et al.*, 2015) (PATH *et al.*, 2022);

- Dimensões das células (largura × comprimento): Silício: 166 mm × 166 mm; CIGS: 100 mm × 100 mm; CdTe: 102 mm × 102 mm; Perovskita: 3,16 mm × 3,16 mm
- Capacidade da bateria: 10.000 mAh
- Tensão nominal: 14,8 V
- Fator de perda por temperatura: 0,85
- Eficiência do MPPT: 0,90
- Penalidade por peso extra: 0,1
- Fator aerodinâmico: 1,05

Os valores de eficiência utilizados foram obtidos em publicações recentes e na base de dados do National Renewable Energy Laboratory (NREL) . A Figura 3 apresenta um comparativo das eficiências para diferentes tecnologias de células solares, servindo de referência para o algoritmo desenvolvido.

Figura 3 – Dados de células solares segundo a NREL



Fonte: (ROCKIES, 2025)

Como algumas tecnologias fotovoltaicas, especialmente as células de perovskita, possuem valores de desempenho reportados majoritariamente em condições laboratoriais, optou-se por utilizar, para fins de comparação, os maiores índices de eficiência registrados em ambiente controlado para todas as tecnologias analisadas. Essa escolha garante uma análise equitativa entre as células, permitindo avaliar seu potencial máximo de aplicação em drones.

Com base nesses dados, foi elaborada a Tabela 1 (adaptado de (ALBERI *et al.*, 2024; PICKEREL, 2019; VICTOR *et al.*, 2018; KALTENBRUNNER *et al.*, 2015; PARATHRAJU; UMASANKAR, 2025; PATH *et al.*, 2022), que sintetiza os parâmetros mais relevantes para a implementação das células fotovoltaicas em veículos aéreos não tripulados. A tabela apresenta, de maneira objetiva, as principais características de cada



tecnologia, facilitando a comparação entre elas e destacando suas diferenças fundamentais.

Tabela 1 - Overview das tecnologias de células fotovoltaicas de filme-fino

Célula	Eficiência máx. (laboratório)	Peso típico e Potência/Peso	Custo (USD/W)	Estabilidade de	Degradação anual
Silício monocristalino	≈26,8%	~130 g/m <sup>2</sup> (≈1,9 W/g)	≈0,25/W	Muito alta	<1% (tipicamente ≈0,5%)
Silício policristalino	≤20%	~130 g/m <sup>2</sup> (≈1,9 W/g)	≈0,27/W	Muito alta	<1%
CIGS	≈24%	≈300–600 g/m <sup>2</sup> (1,0–3,3 W/g)	≈0,48/W	Médio (encapsulamento é crucial)	≈0,5% (em campo)
CdTe	≈22%	≈650 g/m <sup>2</sup> (≈0,25 W/g)	≈0,28/W	Alta (módulos CdTe rígidos)	≈0,5%
Perovskita	≈34,6% (Tandem)	Muito Baixo (até 44 W/g)	≈0,35/W estimado	Baixa	Alta

Fonte: Autores (2025)

Os valores de desempenho das células fotovoltaicas podem apresentar variações significativas dependendo do fabricante e das condições experimentais sob as quais foram testadas. Por essa razão, adotou-se uma média dos dados mais recentes e representativos disponíveis na literatura. Ressalta-se que a eficiência comercial típica de módulos flexíveis é, em geral, inferior aos valores obtidos em ambiente laboratorial; portanto, os dados de laboratório devem ser interpretados como uma estimativa do potencial máximo das tecnologias, refletindo o desempenho alcançável mediante otimizações no processo de fabricação.

Além disso, as avaliações de maturidade tecnológica e estabilidade referem-se especificamente às versões flexíveis dessas células fotovoltaicas, uma vez que nem todas as tecnologias analisadas possuem aplicações comerciais amplamente estabelecidas nesse formato.

### 3.3 Desenvolvimento do Algoritmo em Python

O algoritmo foi desenvolvido em Python 3.8, incorporando as equações de irradiância efetiva e potência fotogerada para estimar o ganho de autonomia do drone. A Figura 4 apresenta um trecho representativo do código utilizado no desenvolvimento do programa, ilustrando a implementação dos principais cálculos adotados.

A aplicação do algoritmo às diferentes tecnologias fotovoltaicas apresentadas na Tabela 1 permitiu obter os resultados mostrados no gráfico de aumento de autonomia exibido na Figura 5.

Figura 4 – Código desenvolvido em Python

```

else:
    delta_t = 0

# Autonomia total
t_total = t_base + delta_t

# --- Recarga em solo ---
E_bat = (Cap_mAh / 1000) * V_bat # energia da bateria em Wh
t_recarga = E_bat / P_captada if P_captada > 0 else float("inf")
# Resultados
print("\n=====")
print("RESULTADOS PARA O MODELO:", modelo)
print("=====")
print(f"IRRADIÂNCIA:")
print(f" - Efetiva: {G_ef:.2f} W/m²")
print(f"POTÊNCIA:")
print(f" - Captada teórica: {P_captada_teorica:.2f} W")
print(f" - Captada real: {P_captada:.2f} W")
print(f" - Consumo base: {P_consumo:.2f} W")
print(f" - Consumo corrigido: {P_consumo_corrigido:.2f} W")
print(f"PESO:")
print(f" - Adicional do painel: {peso_extra:.4f} kg")
print(f" - Penalidade por peso: {penalidade*100:.2f}%")
print(f"AUTONOMIA:")
print(f" - Autonomia base: {t_base:.2f} min")
print(f" - Ganho estimado: {delta_t:.2f} min")
print(f" - Autonomia total: {t_total:.2f} min")
print(f"BATERIA:")
print(f" - Energia: {E_bat:.2f} Wh")
print(f" - Tempo de recarga em solo: {t_recarga:.2f} h")
print("=====")

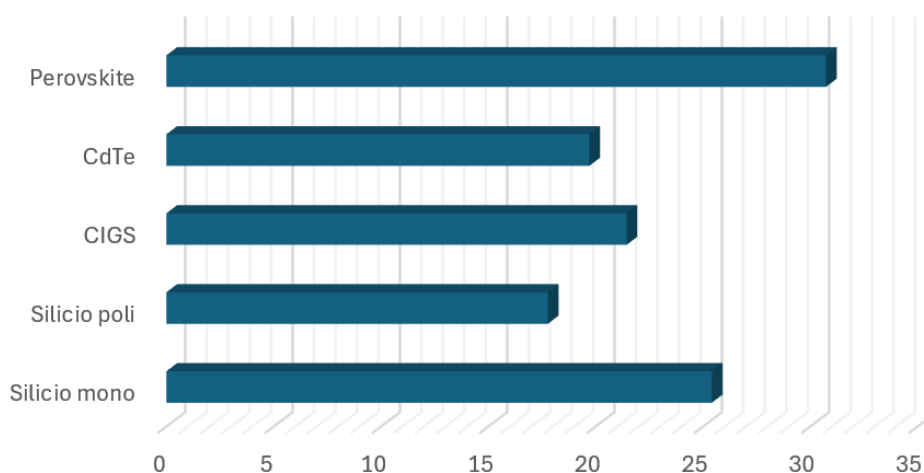
# Análise de viabilidade

if peso_extra > 0.2:
    print("ALERTA: Peso adicional significativo - pode comprometer a autonomia.")

```

Fonte: Autores (2025)

Figura 5 – Aumento da autonomia estimado para cada célula (em minutos)



Fonte: Autores, (2025)

Com base no gráfico apresentado, observa-se uma disparidade significativa entre as tecnologias analisadas, destacando-se a célula de perovskita. Embora ainda seja uma tecnologia emergente, a perovskita demonstra alto potencial de aplicação, sobretudo devido à sua elevada eficiência específica. Entretanto, seu uso prático ainda é limitado por fatores como baixa durabilidade em ambiente real e dificuldades de produção em larga escala.

Tomando a célula de perovskita como exemplo, a inserção de seus parâmetros no algoritmo resultou nos valores de autonomia e tempo de recarga ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Resultado ganho de autonomia célula de perovskita

```
AUTONOMIA:
- Autonomia base: 60.00 min
- Ganho estimado: 30.73 min
- Autonomia total: 90.73 min
BATERIA:
- Energia: 148.00 Wh
- Tempo de recarga em solo: 2.72 h
```

Fonte: Autores, (2025)

### 3.2. Validação dos Resultados

A utilização de energia solar em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) tem se mostrado uma estratégia eficaz para aumentar a autonomia de voo (ZHANG *et al.*, 2013), permitindo ampliar a área monitorada por missão e otimizar o tempo de operação das equipes de campo. Diversos estudos apontam ganhos significativos decorrentes da integração entre sistemas fotovoltaicos e drones. Schmidt e Anjos (2016), por exemplo, demonstraram que a implementação de células solares em um VANT resultou em um acréscimo de aproximadamente 27 minutos na autonomia — um aumento de 35,7% em relação ao tempo original de 1 hora e 15 minutos — mesmo com a utilização de apenas 41% da área disponível da aeronave devido a limitações geométricas.

Além do aumento de autonomia, a integração de sistemas fotovoltaicos pode contribuir para a ampliação da capacidade de carga útil, como discutido por Dinca *et al.*, (2023), que destacam novas configurações estruturais capazes de permitir o transporte de cargas adicionais, aspecto particularmente relevante para setores que buscam inovação em serviços logísticos e de entrega.

Entre as tecnologias avaliadas, as células de filme-fino CIGS se destacam como uma opção vantajosa por apresentarem rendimento moderado aliado a custos relativamente acessíveis, além da disponibilidade em formatos flexíveis. As células de silício mono e policristalino, por sua vez, permanecem como alternativas robustas e amplamente consolidadas no mercado, apresentando eficiência crescente devido a avanços contínuos no processo de fabricação.

Entretanto, a tecnologia de perovskita tem atraído atenção significativa devido às suas elevadas eficiências e ao baixo custo potencial de produção. Embora apresente desempenho superior às demais tecnologias, sua aplicação prática ainda enfrenta importantes desafios, como limitada durabilidade em ambiente real, dificuldades de produção em larga escala e questões relacionadas à estabilidade do material e à integração com silício. Ainda assim, conforme apontado por Seyisi *et al.*, (2025), caso essas barreiras sejam superadas, a perovskita possui elevado potencial para se tornar dominante no mercado fotovoltaico.

#### IV. CONCLUSÃO

O presente estudo apresentou o desenvolvimento e a análise de um algoritmo capaz de estimar o ganho de autonomia de drones de pequeno e médio porte por meio da integração de células fotovoltaicas em sua fuselagem. A partir da comparação entre diferentes tecnologias, silício monocristalino e policristalino, CIGS, CdTe e perovskita, foi possível identificar tendências quanto ao potencial de aplicação de cada uma delas em sistemas embarcados.

Os resultados demonstraram que o modelo computacional forneceu estimativas coerentes com valores reportados na literatura, reforçando sua aplicabilidade como ferramenta preliminar de análise. Verificou-se que tecnologias de filme-fino, como CIGS e CdTe, apresentam desempenho satisfatório considerando sua leveza e flexibilidade, embora seu ganho de autonomia seja moderado. As células de silício, apesar do maior peso, continuam viáveis por sua maturidade comercial e estabilidade operacional.

A perovskita, por sua vez, destacou-se como a tecnologia de maior potencial, exibindo elevado desempenho específico e promissora capacidade de ampliação da autonomia. Contudo, sua aplicação prática ainda é limitada devido a desafios de durabilidade, estabilidade e escalabilidade de produção. Assim, mesmo com ganhos expressivos na simulação, sua adoção imediata em drones exige avanços significativos em confiabilidade.

Em síntese, o estudo confirma que a integração de células solares em VANTs representa uma estratégia viável para ampliar a autonomia de voo, especialmente sob boas condições de irradiância. O algoritmo desenvolvido mostrou-se uma ferramenta útil para análises comparativas e para o planejamento de configurações fotovoltaicas, servindo como base para futuras investigações que incorporem modelos aerodinâmicos mais robustos, variações dinâmicas de irradiância e testes experimentais em voo.

#### V. REFERÊNCIAS

ALBERI, K.; BERRY, J. J.; CORDELL, J. J.; FRIEDMAN, D. J.; GEISZ, J. F.; KIRMANI, A. R.; LARSON, B. W.; MCMAHON, W. E.; MANSFIELD, L. M.; NDIONE, P. F.; OWEN-BELLINI, M.; PALMSTROM, A. F.; REESE, M. O.; REESE, S. B.; STEINER, M. A.; TAMBOLI, A. C.; THEINGI, S.; WARREN, E. L. Review A roadmap for tandem photovoltaics. **Joule**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 658–692, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.01.017>.

DINCA, L.; CORCAU, J.-I.; VOINEA, D.-G. Solar UAVs—More Aerodynamic Efficiency or More Electrical Power?. **Energies**, [s. l.], v. 16, n. 9, p. 3778, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/9/3778>.

ISMAË, A. **Modeling and Simulation of Hourly Irradiance for Solar Applications in Chad : Case of the City of Abeche**. [s. l.], v. 40, n. 4, p. 976–986, 2022.

JO, W. Flexible Cu ( In , Ga ) Se 2 photovoltaics for bending applications : advances from materials to panels. [s. l.], p. 2554–2577, 2025.

KALTENBRUNNER, M.; ADAM, G.; GŁOWACKI, E. D.; DRACK, M.; SCHWÖDIAUER, R.; LEONAT, L.; APAYDIN, D. H.; GROISS, H.; SCHARBER, M. C.; WHITE, M. S.; SARICIFTCI, N. S.; BAUER, S. Flexible high power-per-weight perovskite solar cells with chromium oxide–metal contacts for improved stability in air. **NATURE MATERIAL**, [s. l.], v. 14, n. October, 2015.

PARATHRAJU, P.; UMASANKAR, P. **Performance evaluation of ultrathin CdTe-based solar cells with dual absorbers via SCAPS-1D simulation.** [s. l.], p. 1–20, 2025.

PATH, T.; COMMERCIALIZATION, P.; STATES, U.; ENERGY, S. The Path to Perovskite Commercialization : A Perspective from the United States Solar. [s. l.], 2022.

PICKEREL, K. **SunPower increases solar cell size with new 400-W A-Series of modules for the residential market.** [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.solarpowerworldonline.com/2019/03/sunpower-increases-solar-cell-size-with-new-400-w-a-series-of-modules-for-the-residential-market/>. .

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro - RJ: CEPTEL – CRESESB Edição, 2014. 2014.

ROCKIES, N. L. of the. **Best Research-Cell Efficiency Chart.** [S. l.: s. n.], 2025. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>. Acesso em: 10 dez. 2025.

SCHMIDT, G.; ANJOS. **Estudo E Desenvolvimento Da Aplicação De Um Sistema Fotovoltaico Em Drones.** [s. l.], 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/157857/001021047.pdf?sequence=1>.

SEYISI, T.; FOU DA-MBANGA, B. G.; MNYANGO, J. I.; NTHWANE, Y. B.; NYONI, B.; MHLANGA, S. Major challenges for commercialization of perovskite solar cells : A critical review. **Energy Reports**, [s. l.], v. 13, n. September 2024, p. 1400–1415, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.01.019>.

VICTOR, P.; MEDEIRO, R. A. De; FERREIRA, C. L.; SOUZA, D.; CRUZ, L. R.; DHERE, N. G. CARACTERIZAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES DE CIGS FABRICADAS SOBRE SUBSTRATOS FLEXÍVEIS. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: [s. n.], 2018.

ZHANG, Q.; HUANG, J.; WEN, F. Energy Balance Design and Analysis of Long-flight-time Solar Powered UAV. In: PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND ELECTRONICS ENGINEERING (ICCSEE 2013), 2013, Paris, France. **Anais [...]**. Paris, France: Atlantis Press, 2013. Disponível em: <http://www.atlantis-press.com/php/paper-details.php?id=4982>.

## VI. AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus. Agradeço também aos meus professores Thaís Santos Castro e Teófilo Miguel de Souza, pelo apoio e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

## VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.