

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

VÍTOR DONEGÁ MARCHIORI

EFEITO DE BATIDAS DE ASA NA GERAÇÃO DE POTÊNCIA PARA VANTs
BIOINSPIRADOS USANDO CÉLULAS SOLARES

Ilha Solteira

2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VÍTOR DONEGÁ MARCHIORI

**EFEITO DE BATIDAS DE ASA NA GERAÇÃO DE POTÊNCIA PARA VANTs
BIOINSPIRADOS USANDO CÉLULAS SOLARES**

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Douglas D. Bueno

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo B. Santos

Ilha Solteira

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M317e Marchiori, Vítor Donegá.
Efeito de batidas de asa na geração de potência para VANTs bioinspirados usando células solares / Vítor Donegá Marchiori. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
99 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Mecânicas, 2026

Orientador: Douglas Domingues Bueno

Coorientador: Rodrigo Borges Santos

Inclui bibliografia

1. Asas batentes. 2. Células solares. 3. Eficiência energética. 4. Geração embarcada de potência. 5. VANT bioinspirado.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento científico e tecnológico na área de veículos aéreos não tripulados (VANTs) bioinspirados com integração de sistemas fotovoltaicos. Do ponto de vista científico, o trabalho propõe uma abordagem integrada que combina modelagem estrutural, análise da cinemática de batimento de asas e modelagem elétrica de células solares, permitindo investigar os efeitos do movimento oscilatório na geração de potência fotovoltaica embarcada. Sob a perspectiva tecnológica e inovadora, os resultados obtidos podem contribuir para o desenvolvimento de plataformas aéreas mais eficientes energeticamente, capazes de explorar fontes renováveis de energia para ampliar sua autonomia de voo. Do ponto de vista social e econômico, o avanço de tecnologias baseadas em energia solar aplicada a VANTs pode favorecer soluções sustentáveis para coleta de dados em regiões remotas, redução de custos operacionais e diminuição da dependência de fontes convencionais de energia. Em termos de desenvolvimento sustentável, o estudo está alinhado aos objetivos globais de promoção de tecnologias limpas e uso eficiente de recursos energéticos, ao investigar estratégias para integrar geração solar a sistemas aéreos leves. Assim, os resultados obtidos contribuem para ampliar o entendimento científico sobre a interação entre dinâmica estrutural e geração fotovoltaica em plataformas aéreas bioinspiradas, abrindo perspectivas para pesquisas futuras e para o desenvolvimento de novas soluções tecnológicas baseadas em energia renovável.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research contributes to advancing scientific and technological knowledge in the field of bioinspired unmanned aerial vehicles (UAVs) integrated with photovoltaic systems. From a scientific perspective, the work proposes an integrated approach combining structural modeling, flapping-wing kinematics and electrical modeling of solar cells, enabling the investigation of the influence of oscillatory wing motion on onboard photovoltaic power generation. From a technological and innovative standpoint, the results obtained may contribute to the development of more energy-efficient aerial platforms capable of exploiting renewable energy sources to increase flight autonomy. From a social and economic perspective, advances in solar-powered UAV technologies may support sustainable solutions for data acquisition in remote areas, reduce operational costs and decrease dependence on conventional energy sources. Regarding sustainable development, the study is aligned with global efforts to promote clean technologies and efficient energy use by investigating strategies to integrate solar power generation into lightweight aerial systems. Therefore, the results of this work contribute to expanding the scientific understanding of the interaction between structural dynamics and photovoltaic power generation in bioinspired aerial platforms, opening new perspectives for future research and the development of innovative renewable-energy-based technologies.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: EFEITO DE BATIDAS DE ASA NA GERAÇÃO DE POTÊNCIA PARA VANTs BIOINSPIRADOS USANDO CÉLULAS SOLARES

AUTOR: VÍTOR DONEGÁ MARCHIORI

ORIENTADOR: DOUGLAS DOMINGUES BUENO

COORIENTADOR: RODRIGO BORGES SANTOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, área: Ciências Mecânicas pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. DOUGLAS DOMINGUES BUENO (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Mecânica / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
 **DOUGLAS DOMINGUES BUENO**
Data: 02/03/2026 17:42:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ILMAR FERREIRA SANTOS (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Mecânica / Technical University of Denmark



Prof. Dr. GREGORY BREGION DANIEL (Participação Virtual)

Departamento de Sistemas Integrados / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Documento assinado digitalmente
 **GREGORY BREGION DANIEL**
Data: 02/03/2026 11:37:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ilha Solteira, 24 de fevereiro de 2026.

Este trabalho é dedicado a todos que me apoiaram durante minha formação, e àqueles que
trilharam esse caminho comigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Márcia e Marcelo, que não mediram esforços para educar a mim e meus irmãos, Felipe, Lucas e Manuela, desde a criação até os dias atuais. Sempre me apoiando em todos os âmbitos da vida. Muito obrigado.

À minha namorada, Amanda, por ser a luz nos meus dias, por seu infinito companheirismo, paciência, compreensão, amor e apoio em todas as circunstâncias. Sua presença é meu refúgio e sua força, meu alicerce. Obrigado por estar ao meu lado em cada momento, por me inspirar a ser melhor e por fazer de nossa jornada uma aventura extraordinária.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Douglas D. Bueno, por ser mais que um orientador, um amigo em que posso confiar. Por toda orientação e conselho, na vida pessoal e profissional, e por agregar, de forma incrível, na minha formação. Sua expertise e comprometimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, e sua orientação me proporcionou um crescimento acadêmico e profissional incomensurável. Muito obrigado por acreditar no potencial deste projeto e por me apoiar em todas as etapas.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Rodrigo B. Santos, pela orientação excepcional, pelas contribuições incalculáveis ao meu trabalho e pela disponibilidade constante. Agradeço por suas críticas construtivas, sugestões valiosas e pela paciência ao longo de todo o processo.

Também deixo meu agradecimento aos meus colegas do Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes (GMSINT) e do Laboratório de Sistemas Avançados (Lab-SA), por todo o apoio, troca de conhecimentos, colaboração, amizade e bons momentos ao longo deste percurso.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro, processo 2023/15904-4, que possibilitou a execução deste trabalho com dedicação exclusiva.

*“Success is 1% inspiration, 98% perspiration, and 2% attention to detail.”
(Phil Dunphy)*

RESUMO

O presente trabalho investiga o efeito do movimento oscilatório de asas bioinspiradas na eficiência da geração de potência elétrica por células solares embarcadas em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), por meio de abordagem numérica e experimental. A pesquisa foi motivada pela lacuna existente na literatura sobre a integração de geração fotovoltaica em plataformas aéreas com cinemática variável, especialmente em configurações de asas batentes. A metodologia adotada contemplou duas frentes complementares. Primeiramente, desenvolveu-se um modelo computacional baseado na teoria de vigas de Euler-Bernoulli e no método dos Elementos Finitos para simular a resposta dinâmica da asa sujeita a excitação rotacional harmônica. A partir da reconstrução da geometria defletida ao longo do ciclo de batimento, aplicou-se um modelo vetorial para cálculo da irradiância solar incidente em diferentes blocos de células fotovoltaicas. O modelo possibilitou avaliar o impacto das amplitudes e frequências de oscilação na captação de energia solar, considerando diferentes orientações relativas ao sol. Em paralelo, realizou-se uma campanha experimental em bancada controlada, utilizando um mecanismo oscilatório para reproduzir o movimento de batida em asas instrumentadas com placas solares comerciais. Os ensaios permitiram comparar a geração de potência em condições estacionária e oscilante, evidenciando perdas associadas à variabilidade angular induzida pela oscilação. Os resultados indicaram que o movimento de batida provoca uma redução na potência gerada em regime oscilante, com magnitude dependente da amplitude e frequência de oscilação. A pesquisa contribui para a compreensão dos desafios e oportunidades associados à integração de sistemas fotovoltaicos em VANTs bioinspirados, oferecendo subsídios para o aprimoramento do projeto de aeronaves energeticamente autossuficientes.

PALAVRAS-CHAVE: asas batentes; células solares; eficiência energética; geração embarcada de potência; VANT bioinspirado.

ABSTRACT

This study investigates the effect of the oscillatory motion of bio-inspired wings on the efficiency of electrical power generation by solar cells embedded in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), through numerical and experimental approaches. The research is motivated by the existing gap in the literature regarding the integration of photovoltaic generation in aerial platforms with variable kinematics, particularly in flapping-wing configurations. The adopted methodology comprises two complementary approaches. First, a computational model based on the Euler-Bernoulli beam theory and the Finite Element method was developed to simulate the dynamic response of a wing subjected to harmonic rotational excitation. From the reconstruction of the deflected geometry along the flapping cycle, a vector-based model was applied to calculate the incident solar irradiance on different photovoltaic cell blocks. The model enabled the evaluation of the influence of oscillation amplitudes and frequencies on solar energy capture, considering different orientations relative to the sun. In parallel, an experimental campaign was conducted using a controlled bench-top setup equipped with an oscillatory mechanism to reproduce the flapping motion in wings instrumented with commercial solar panels. The tests allow one to compare power generation under stationary and oscillatory conditions, highlighting losses associated with the angular variability induced by the motion. The results indicated that the flapping motion leads to a reduction in the generated electrical power under oscillatory operation, with a magnitude dependent on the amplitude and frequency of oscillation. The research contributes to understand the challenges and opportunities related to the integration of photovoltaic systems in bio-inspired UAVs, providing insights for improving the design of energetically self-sufficient aircraft.

KEYWORDS: bio-inspired UAV; energy efficiency; flapping wings; onboard power generation; solar cells.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos VANTs de acordo com sua configuração.	23
Figura 2 – Maiores eficiências de conversão confirmadas para células fotovoltaicas. . .	27
Figura 3 – Ilustração de mecanismos de batidas de asa.	33
Figura 4 – Mecanismo de eixo transversal.	34
Figura 5 – Fluxograma da abordagem metodológica adotada na pesquisa.	38
Figura 6 – Circuito equivalente de uma célula solar, sendo I_L a corrente fotogerada, I_D a corrente do diodo, I_{sh} a corrente de fuga através do resistor <i>shunt</i> , I_{out} a corrente de saída da célula solar, R_{sh} a resistência <i>shunt</i> , R_s a resistência em série, V_j a tensão elétrica na junção semicondutora e V_{out} a tensão elétrica nos terminais externos.	40
Figura 7 – Esquema da representação da asa como uma viga de Euler-Bernoulli.	44
Figura 8 – Fluxograma do modelo computacional desenvolvido para análise da geração de potência elétrica em asas batentes com células solares.	47
Figura 9 – Esquema da bancada experimental desenvolvida.	48
Figura 10 – Instrumentação utilizada nos testes.	49
Figura 11 – Esquema do sistema de geração fotovoltaica.	50
Figura 12 – Esquema do sistema de armazenamento e alimentação.	51
Figura 13 – Esquema do sistema motopropulsor.	51
Figura 14 – Esquema completo do sistema MPPT.	52
Figura 15 – Protótipo do VANT bioinspirado desenvolvido em ambiente CAD, com indicação dos principais parâmetros geométricos: (a) 1006,62 mm; (b) 123,50 mm; (c) 366,30 mm; (d) 79,00 mm; (e) 231,51 mm; (f) 220,39 mm; (g) 94,00 mm; (h) 48,30 mm; (i) 105,00 mm.	53
Figura 16 – Equipamento de impressão 3D utilizado na prototipagem.	54
Figura 17 – Vetor de deslocamento do mecanismo de batimento.	55
Figura 18 – Curvas $I-V$ e $P-V$ da célula solar: efeito da irradiância.	60
Figura 19 – Curvas $I-V$ e $P-V$ da célula solar: efeito da temperatura.	61
Figura 20 – Curvas $I-V$ e $P-V$ da célula solar: efeito de R_s	63
Figura 21 – Curvas $I-V$ e $P-V$ da célula solar: efeito de R_{sh}	64
Figura 22 – Curvas $I-V$ e $P-V$ da célula solar: efeito de I_0	64
Figura 23 – Esquema das configurações de posicionamento das células solares ao longo da viga.	66
Figura 24 – Influência da frequência e da amplitude de batimento na potência elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos (configuração 1).	66
Figura 25 – Influência da frequência e da amplitude de batimento na potência elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos (configuração 2).	68

Figura 26 – Influência da frequência e da amplitude de batimento na potência elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos (configuração 3).	69
Figura 27 – Influência da frequência e da amplitude de batimento na potência elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos (configuração 4).	70
Figura 28 – Espectro de potência elétrica para a configuração 1.	71
Figura 29 – Energia total para a configuração 1, calculadas para as condições de batidas com os pares frequência (Hz) e amplitude (graus) (f_i, A_i) , $i = 1, 2$, sendo $(1, 30)$, $(1, 60)$, $(2, 30)$ e $(2, 60)$ a partir da esquerda.	72
Figura 30 – Bancada experimental utilizada nos ensaios de geração de potência elétrica.	73
Figura 31 – Potência elétrica gerada ao longo do tempo para ensaios estacionários da célula solar, com sobreposição das cinco repetições experimentais e da curva média.	75
Figura 32 – Evolução temporal das variáveis ambientais medidas durante o ensaio oscilatório: irradiância solar, umidade relativa do ar, temperatura da célula solar e temperatura ambiente.	76
Figura 33 – Variação temporal da potência elétrica em torno do valor médio, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 0,5 Hz.	77
Figura 34 – Variação temporal da potência elétrica em torno do valor médio, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 1 Hz.	78
Figura 35 – Variação temporal da potência elétrica em torno do valor médio, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 2 Hz.	78
Figura 36 – Espectro em frequência para a variação temporal da potência elétrica experimental, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 0,5 Hz.	79
Figura 37 – Espectro em frequência para a variação temporal da potência elétrica experimental, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 1 Hz.	79
Figura 38 – Espectro em frequência para a variação temporal da potência elétrica experimental, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 2 Hz.	80
Figura 39 – Circuito de aquisição de dados elétricos.	81
Figura 40 – Placa solar utilizada no sistema.	82
Figura 41 – Conversor Boost CC-CC.	83
Figura 42 – Bateria Li-Po 2200 mAh.	84
Figura 43 – Placa de proteção BMS.	84
Figura 44 – Motor SunnySky X2212-III.	85
Figura 45 – ESC de 40A com BEC integrado.	85
Figura 46 – Microcontrolador Arduino UNO.	86
Figura 47 – Potenciômetro de 10k Ω	86

Figura 48 – Sistema MPPT montado.	87
Figura 49 – Localização da Estância Turística de Ilha Solteira em relação ao estado de São Paulo e ao Brasil.	87
Figura 50 – Distribuição da radiação solar horizontal global (GHI) no Brasil.	88
Figura 51 – Distribuição da radiação solar direta normal (DNI) no Brasil.	88
Figura 52 – Etapa de fabricação aditiva dos componentes estruturais.	89
Figura 53 – Protótipo físico final do VANT bioinspirado.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos VANTs da OTAN.	22
Tabela 2 – Parâmetros utilizados no modelo elétrico da célula fotovoltaica para geração das curvas $I-V$ e $P-V$	60
Tabela 3 – Energia total gerada para diferentes configurações de posicionamento das células solares, frequências de excitação e amplitudes de batida.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGL	Above Ground Level
ANCF	Absolute Nodal Coordinate Formulation
BEC	Battery Eliminator Circuit
BLOS	Beyond Line of Sight
BMS	Battery Management System
CAD	Computer-Aided Design
DNI	Direct Normal Irradiation
ESC	Electronic Speed Control
FDM	Fused Deposition Modeling
GEAC	Greedy Energy-Aware Control
GHI	Global Horizontal Irradiation
HALE	High-Altitude Long-Endurance
LEV	Leading Edge Vortices
LOS	Line of Sight
MALE	Medium-Altitude Long-Endurance
MEF	Método dos Elementos Finitos
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MSL	Mean Sea Level
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
PEAC	Predictive Energy-Aware Control
PSD	Power Spectral Density

SHF	Smooth Harmonic Flapping
UAVs	Unmanned Aerial Vehicles
UVLM	Unsteady Vortex Lattice Method
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados

LISTA DE SÍMBOLOS

Sobrescritos

$()^{\{B\}}$	Referencial do corpo (asa)
$()^{\{W\}}$	Referencial inercial terrestre
$(\dot{})$	Derivada temporal de primeira ordem
$(\ddot{})$	Derivada temporal de segunda ordem

Subscritos

$()_{amb}$	Relativo ao ambiente
$()_{cs}$	Relativo à célula solar
$()_e$	Elemento
$()_{gen}$	Quantidade gerada
$()_{in}$	Entrada
$()_l$	Graus de liberdade livres
$()_L$	Asa esquerda
$()_m$	Graus de liberdade impostos
$()_{nom}$	Valor nominal
$()_{oc}$	Circuito aberto
$()_{out}$	Saída
$()_p$	Paralelo (elétrico)
$()_R$	Asa direita
$()_s$	Série (elétrico)
$()_{sC}$	Curto-circuito
$()_{sh}$	Resistência de derivação (shunt)

Matrizes e Vetores

$\mathbf{A}$	Matriz dinâmica do sistema
$\mathbf{B}$	Matriz associada ao movimento imposto na base
$\mathbf{K}$	Matriz de rigidez
$\mathbf{M}$	Matriz de massa
$\hat{\mathbf{n}}_{\text{Sol}}^{\{W\}}$	Vetor unitário de radiação solar no referencial inercial terrestre
$\hat{\mathbf{n}}_{\text{asa}}^{\{B\}}$	Vetor normal local à superfície da asa no referencial do corpo
$\mathbf{R}_x$	Matriz de rotação associada ao ângulo de rolamento (ϕ)
$\mathbf{R}_y$	Matriz de rotação associada ao ângulo de arfagem (ϑ)
$\mathbf{R}_z$	Matriz de rotação associada ao ângulo de guinada (ψ)
$\mathbf{u}$	Vetor de deslocamentos
$\mathbf{x}$	Vetor de estados
Φ	Fluxo solar

Letras Gregas

α	Ângulo de altitude solar [rad]
β_0, β_1	Ângulos auxiliares de montagem [rad]
γ	Ângulo de azimuth solar [rad]
Δ	Variação
η	Eficiência
θ	Rotação angular modal [rad]
$\theta_{0,1,2,3}$	ângulos de montagem e rotação instantânea das ligações [rad]
ϑ	Ângulo de arfagem [rad]
ρ	Densidade do material [kg/m ³]
σ	Desvio padrão
ϕ	Ângulo de rolamento [rad]

$\varphi(t)$	Ângulo de batimento da asa [rad]
ψ	Ângulo de guinada [rad]
ω	Deslocamento transversal modal
ω_θ	Frequência angular de excitação [rad/s]

Letras Latinas

A	Área da seção transversal [m ²]
A_1	Área efetiva de captação solar [m ²]
A_θ	Amplitude angular de batimento [rad]
E	Módulo de elasticidade [Pa]
E_g	Energia de bandgap do semicondutor [eV]
f	Frequência de batimento [Hz]
G	Irradiância solar incidente [W/m ²]
g_f	Eficiência fracional da captação
I	Momento de inércia da seção [m ⁴]
$I(t)$	Corrente elétrica instantânea [A]
I_D	Corrente que atravessa o diodo [A]
I_L	Corrente fotogerada [A]
I_{out}	Corrente de saída da célula [A]
I_{sc}	Corrente de curto-circuito [A]
I_{sh}	Corrente de fuga através da resistência de derivação [A]
I_0	Corrente de saturação reversa do diodo [A]
K_i	Coeficiente térmico da corrente de curto-circuito [A/K]
k	Constante de Boltzmann [1.38×10^{-23} J/K]
l_{AC}	Distância direta entre A e C [m]
l_e	Comprimento do elemento finito [m]

l_0	Distância base–articulação [m]
$l_{1,2,3}$	Comprimentos das barras da manivela [m]
l_4	Extensão ao centro de massa da asa [m]
n	Fator de idealidade do diodo
N_p	Número de células em paralelo
N_s	Número de células em série
$P(t)$	Potência elétrica instantânea [W]
P_{gen}	Potência efetivamente gerada [W]
q	Carga elementar do elétron [1.6×10^{-19} C]
R_s	Resistência em série [Ω]
R_{sh}	Resistência de derivação [Ω]
$S_2()$	Função de suavização <i>smootherstep</i>
t	Tempo [s]
T	Temperatura absoluta [K]
T_{amb}	Temperatura ambiente [$^{\circ}$ C]
T_{cs}	Temperatura da célula solar [$^{\circ}$ C]
T_{nom}	Temperatura nominal [$^{\circ}$ C]
V_j	Tensão na junção semicondutora [V]
V_{oc}	Tensão de circuito aberto [V]
V_{out}	Tensão nos terminais externos [V]
$V(t)$	Tensão elétrica instantânea [V]
V_T	Tensão térmica [V ou J/C]
x_{c2} e y_{c2}	Coordenadas do centroide AB [m]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	21
1.1.1	Visão Geral dos VANTs e sua Evolução	22
1.1.2	VANTs Bioinspirados	24
1.1.3	Geração de Energia Solar	26
1.1.3.1	Efeito Fotovoltaico	28
1.1.4	Dinâmica de Asas Batentes	30
1.1.4.1	Mecanismos de Batidas de Asa	32
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	34
1.3	OBJETIVOS	35
1.4	PRINCIPAIS RESULTADOS ALCANÇADOS	36
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	36
2	METODOLOGIA	37
2.1	MODELAGEM DINÂMICA	39
2.1.1	Captação de Energia Solar	39
2.1.1.1	Modelo Elétrico da Célula Solar	39
2.1.1.2	Modelagem Vetorial de Incidência Solar	42
2.1.2	Modelo Computacional Integrado	44
2.2	MONTAGEM EXPERIMENTAL	47
2.2.1	Desenvolvimento e Construção do Protótipo do Sistema MPPT	49
2.2.2	Protótipo do VANT: CAD e Prototipagem Aditiva	52
2.2.2.1	Cinemática do Batimento de Asa	55
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
3.1	RESULTADOS TEÓRICOS	59
3.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	73
3.2.1	Bancada Experimental	73
3.2.2	Sistema de Aquisição de Dados	81
3.2.3	Desenvolvimento do Protótipo do Sistema MPPT	82
3.2.4	Protótipo Físico do VANT Bioinspirado	88
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
4.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Nas últimas décadas, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) consolidaram-se como plataformas versáteis em múltiplas áreas de aplicação, abrangendo agricultura de precisão, sensoriamento remoto, vigilância ambiental, mapeamento tridimensional, transporte logístico e inspeções industriais em locais de difícil acesso (Austin, 2010; Shakhatreh *et al.*, 2019). Entre suas diferentes configurações, destacam-se os VANTs bioinspirados – ou de asas batentes – também conhecidos como ornitópteros, os quais imitam padrões de voo de aves, morcegos e insetos e têm atraído crescente atenção devido à elevada manobrabilidade, à eficiência aerodinâmica em baixos números de Reynolds e à capacidade de operar em ambientes urbanos, florestais e confinados (Lentink; Dickinson, 2009; Chin; Lentink, 2016).

A biomimética aplicada à engenharia aeronáutica desafia modelos tradicionais de voo e também introduz abordagens alternativas para a concepção de estruturas flexíveis, mecanismos de propulsão oscilatória e estratégias de controle adaptativo (Manabendra *et al.*, 2024). Esse avanço tem sido viabilizado pela convergência entre novos materiais estruturais, atuadores miniaturizados e algoritmos de controle.

Em paralelo, observa-se demanda crescente por tecnologias sustentáveis e de baixo impacto ambiental, particularmente no contexto da transição energética. Nesse cenário, a integração de sistemas fotovoltaicos embarcados a plataformas aéreas constitui alternativa promissora para ampliar a autonomia energética dos VANTs, reduzindo a dependência de baterias e viabilizando missões prolongadas em regiões remotas (Noth, 2008; Oettershagen, 2017; Peciak *et al.*, 2023). A conversão direta da radiação solar em eletricidade durante o voo é especialmente relevante em veículos de pequeno porte, cuja capacidade de carga é limitada por restrições de massa e volume.

Apesar desse potencial, persiste uma lacuna na literatura quanto à quantificação dos efeitos da cinemática oscilatória das asas na captação de energia solar. Em geral, os estudos consideram painéis aplicados a superfícies rígidas e estacionárias, negligenciando variações angulares dinâmicas e periódicas típicas de VANTs de asas batentes (Perez-Rosado; Bruck; Gupta, 2016; Holness *et al.*, 2019). Como consequência, a estimativa da potência gerada pode apresentar erros sistemáticos, uma vez que o ângulo de incidência da radiação solar varia continuamente ao longo do ciclo de batimento.

A dinâmica oscilatória imposta pelo mecanismo de batimento altera continuamente a orientação dos módulos fotovoltaicos, afetando a irradiância efetiva e, consequentemente, a eficiência de conversão. Dependendo de variáveis como amplitude angular, frequência de oscilação, geometria da asa e trajetória de voo, essas flutuações podem resultar em perdas de potência ou, em determinados cenários, em oportunidades de otimização da captação solar ao longo do ciclo

(Liu *et al.*, 2018; Mamun *et al.*, 2022).

Dessa forma, formula-se a seguinte questão científica central: qual é o impacto quantitativo do movimento oscilatório das asas na geração de potência em VANTs bioinspirados? Para respondê-la, torna-se necessário ir além de abordagens descritivas e integrar modelos físicos dinâmicos, simulações numéricas e validação experimental. Assim, este trabalho situa-se na interseção entre engenharia aeronáutica, energias renováveis e sistemas bioinspirados, propondo uma abordagem integrada para quantificar e validar os efeitos do batimento de asas na geração fotovoltaica embarcada. A relevância da investigação relaciona-se ao desenvolvimento de plataformas energeticamente autossuficientes, com aplicações em missões de longa duração em regiões remotas ou em ambientes com infraestrutura terrestre limitada, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7 e 9).

1.1.1 Visão Geral dos VANTs e sua Evolução

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), internacionalmente denominados *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs), têm-se mostrado um dos sistemas mais dinâmicos da engenharia aeroespacial contemporânea. Inicialmente desenvolvidos para aplicações militares, tiveram seu escopo de uso significativamente ampliado nas últimas décadas, passando a abranger setores como entretenimento, agricultura de precisão, sensoriamento remoto, segurança pública, topografia e mapeamento tridimensional (Austin, 2010; Floreano; Wood, 2015). Esse avanço tecnológico tem resultado em incrementos na autonomia de voo, na sofisticação dos sensores embarcados, na capacidade de navegação e na complexidade das missões executadas.

Atualmente, os VANTs são classificados segundo diferentes critérios, como massa, altitude operacional, raio de alcance e configuração aerodinâmica. De acordo com a padronização proposta pela Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), esses sistemas são agrupados em três grandes classes, conforme apresentado na Tabela 1. Tal categorização considera aspectos como a aplicação (tática ou estratégica), a altitude de operação e o tipo de comunicação empregado.

Tabela 1 – Classificação dos VANTs da OTAN.

Classe	Categoria	Altitude	Raio
Classe I (<150 kg)	Pequeno (>20 kg)	≈ 1,5 km (AGL)	50 km (LOS)
	Mini (2 kg – 20 kg)	≈ 1 km (AGL)	≈ 25 km (LOS)
	Micro (<2 kg)	≈ 60 m (AGL)	≈ 5 km (LOS)
Classe II (150 kg – 600 kg)	Tático	≈ 3 km (AGL)	200 km (LOS)
Classe III (>600 kg)	Ataque/Combate	≈ 20 km	Ilimitado (BLOS)
	HALE	≈ 20 km	Ilimitado (BLOS)
	MALE	≈ 14 km (MSL)	Ilimitado (BLOS)

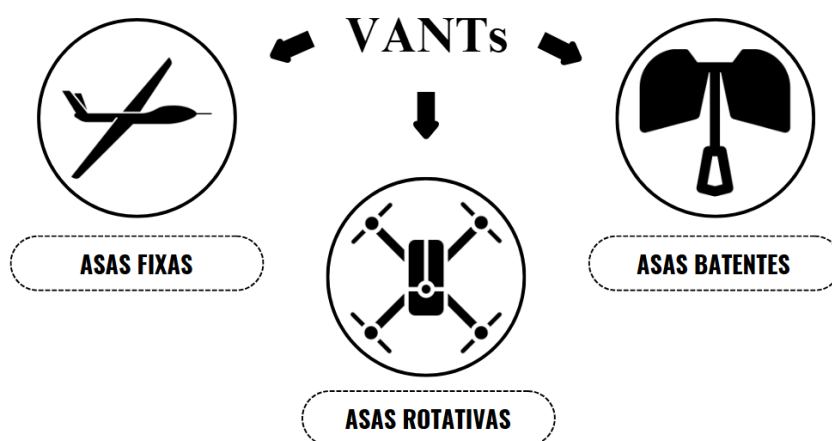
Fonte: Adaptado de (Escritório de Padronização da OTAN, 2014).

Essa classificação fornece um referencial importante para o dimensionamento e a aplicação operacional dos VANTs, especialmente no que diz respeito às restrições de autonomia, carga

útil e alcance de comunicação. Em geral, os modelos da Classe I são amplamente empregados em aplicações civis e urbanas, enquanto aqueles pertencentes às Classes II e III predominam em missões militares ou de longa duração, as quais demandam maior autonomia e capacidade de carga útil.

Além da classificação por porte e alcance, os VANTs também podem ser diferenciados segundo sua arquitetura de voo, conforme ilustrado na Figura 1. As três configurações mais recorrentes são: (i) asas fixas, nas quais a sustentação é gerada por perfis aerodinâmicos; (ii) multirotores, em que a sustentação decorre da rotação de múltiplos rotores; e (iii) configurações híbridas, que combinam características de ambas as arquiteturas.

Figura 1 – Classificação dos VANTs de acordo com sua configuração.



Fonte: Próprio autor.

Cada arquitetura apresenta vantagens e limitações específicas. Os VANTs de asa fixa destacam-se pela capacidade de voo envolvendo longas distâncias, porém requerem infraestrutura para decolagem e pouso. Os multirotores oferecem maior estabilidade em voo estacionário e controle preciso em espaços confinados, embora apresentem autonomia reduzida. As configurações híbridas, por sua vez, buscam equilibrar esses compromissos de desempenho (*trade-offs*) (Shakhatreh *et al.*, 2019). Por outro lado, veículos que batem asa se mostram promissores por permitirem a combinação de vantagens, além de serem estratégicos para aplicações que envolvam camuflagem e/ou ecologia.

A popularização dos VANTs em aplicações civis foi impulsionada, sobretudo, pela miniaturização de componentes eletrônicos, pelo avanço de algoritmos de controle embarcado e pela crescente acessibilidade a sensores de alto desempenho (Amaral *et al.*, 2020; Meng *et al.*, 2020). Em paralelo, o setor militar manteve investimentos em plataformas de grande porte e elevada complexidade, como o *MQ-9 Reaper* e o *RQ-4 Global Hawk*, que incorporam sistemas avançados de vigilância de longo alcance, armamentos integrados e navegação intercontinental (Gertler, 2012).

Apesar desses avanços, a autonomia energética permanece como uma das principais limitações tecnológicas, especialmente em plataformas de pequeno e médio portes. O uso predominante de baterias de íon-lítio impõe restrições significativas ao tempo de voo e à carga útil admissível, em razão dos limites físicos de densidade energética desses dispositivos. Nesse contexto, pesquisas vêm explorando alternativas energéticas promissoras, como motores a combustão interna de alta eficiência, células a combustível e, com destaque crescente, a integração de sistemas fotovoltaicos embarcados. O uso da energia proveniente do Sol em VANTs não apenas permite reduzir a dependência de recarga terrestre, como também habilita missões de maior duração e alcance (Jin *et al.*, 2023).

Um marco relevante foi o desenvolvimento do *Solar Impulse 2*, que completou um voo ao redor do mundo exclusivamente com energia solar, demonstrando o potencial dessa tecnologia em larga escala. Iniciativas como o *Pathfinder* e o *Helios*, desenvolvidos pela NASA, reforçaram essa perspectiva ao viabilizarem plataformas de grande envergadura voltadas a aplicações de vigilância e telecomunicações em alta altitude (Noth, 2008; Sri *et al.*, 2016; Tian; Zygmunt; Shinde, 2022; Mohsan *et al.*, 2022; Peciak *et al.*, 2023; Al-Haddad *et al.*, 2025).

A evolução das células solares – especialmente o amadurecimento das células de silício monocristalino e o avanço das tecnologias flexíveis, como células orgânicas e perovskitas – permite a incorporação de geradores solares diretamente em superfícies aerodinâmicas como asas e fuselagens. Isso promove um uso mais eficiente da área disponível e reduz impactos estruturais e aerodinâmicos indesejados (Perez-Rosado *et al.*, 2015; Chu *et al.*, 2021).

Contudo, a eficiência da geração solar fotovoltaica embarcada é altamente sensível a variáveis externas como a orientação angular dos painéis, incidência e espectro da radiação solar, temperatura dos módulos fotovoltaicos e desempenho do sistema de rastreamento do ponto de máxima potência, conhecido como MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), que busca extrair continuamente a maior quantidade de energia possível, mesmo sob condições variáveis (Shiau *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2018; Lima; Gonçalves, 2018; Mamun *et al.*, 2022).

Tais desafios são ainda mais críticos em configurações bioinspiradas, nas quais o movimento oscilatório das asas impõe alterações frequentes na orientação dos painéis fotovoltaicos, afetando diretamente a irradiância recebida ao longo do ciclo de voo.

Dessa forma, o desenvolvimento contemporâneo dos VANTs vai além da melhoria da aerodinâmica ou da capacidade de carga, exigindo soluções inovadoras de geração e gerenciamento energético embarcado. A integração de sistemas solares a plataformas bioinspiradas se configura como um caminho promissor para aumentar a autossuficiência operacional, reduzir impactos ambientais e ampliar o escopo de aplicações de veículos aéreos não tripulados, especialmente em contextos onde a recarga terrestre é impraticável (Wang *et al.*, 2023).

1.1.2 VANTs Bioinspirados

Os VANTs bioinspirados – também conhecidos como *flapping-wing UAVs* ou ornitópteros – são projetados com base na replicação de padrões de voo observados em aves, morcegos e inse-

tos. As primeiras tentativas de construção desses dispositivos remontam ao início do século XX, quando surgiram iniciativas ainda rudimentares de imitação do batidas de asas, voltadas principalmente a fins militares e acadêmicos. Contudo, foi apenas nas últimas duas décadas que a convergência entre novos materiais estruturais, atuadores miniaturizados, sensores embarcados e técnicas avançadas de modelagem aerodinâmica possibilitou o desenvolvimento de protótipos funcionalmente viáveis e cientificamente relevantes (Manabendra *et al.*, 2024).

O voo com batidas de asas é caracterizado por fenômenos aerodinâmicos não convencionais, tais como o estol atrasado (*delayed stall*) e a formação de vórtices de borda de ataque (LEV, do inglês *Leading Edge Vortices*), os quais desempenham papel fundamental na geração de sustentação em regimes de baixo número de Reynolds, típicos de VANTs de pequeno porte (Lentink; Dickinson, 2009; Altshuler *et al.*, 2015; Lentink; Haselsteiner; Ingersoll, 2015; Chin; Lentink, 2016; Chin *et al.*, 2017). Esses mecanismos, embora desafiadores do ponto de vista do controle e da estabilidade, permitem a obtenção de forças sustentadoras superiores àquelas observadas em perfis aerodinâmicos estáticos sob condições equivalentes.

Um dos exemplos mais emblemáticos da aplicação bem-sucedida de conceitos bioinspirados é a série *DelFly*, desenvolvida pelo *Micro Air Vehicle Laboratory* (MAVLab) da *Delft University of Technology*. Esses protótipos variam desde versões ultraleves (com massa da ordem de 3 gramas e envergadura de 10 cm) até modelos mais complexos equipados com câmeras estéreo e controle autônomo de trajetória. A estabilidade de voo é alcançada por meio da combinação de *feedback* visual e algoritmos de controle de baixa latência, evidenciando o potencial de miniaturização associado à bioinspiração (Croon *et al.*, 2015).

Outro marco relevante foi o desenvolvimento dos robôs *Robo Raven*, da *University of Maryland*, que foram progressivamente otimizados até incorporarem células solares flexíveis integradas às asas e à fuselagem. Essa modificação resultou em um aumento na autonomia de voo de até 46%, demonstrando não apenas a viabilidade estrutural da integração fotovoltaica, mas também seu impacto prático na eficiência energética (Perez-Rosado; Bruck; Gupta, 2016). Tal abordagem multifuncional reforça a motivação desta pesquisa, que busca quantificar o impacto da cinemática oscilatória sobre a geração fotovoltaica embarcada.

O uso de asas batentes apresenta uma série de vantagens funcionais que justificam seu crescente interesse científico e tecnológico:

- Elevada manobrabilidade, possibilitando manobras ágeis e controle refinado em ambientes confinados;
- Maior eficiência energética, ao explorar fenômenos aerodinâmicos transitórios e regimes de planeio;
- Potencial para estruturas multifuncionais, nas quais as asas desempenham simultaneamente funções de sustentação e captação de energia;

- Capacidade de transição entre diferentes regimes de voo, como pairado, cruzeiro e planado, adaptando-se a diferentes contextos operacionais.

Entretanto, essas vantagens são acompanhadas por desafios técnicos expressivos, que ainda limitam a disseminação prática dos VANTs de asa batente:

- Complexidade de modelagem e controle: a flexibilidade estrutural das asas exige a formulação de modelos dinâmicos não lineares acoplados, tornando o controle de voo significativamente mais desafiador (Silva; Bueno, 2024);
- Relação peso-potência sensível: a incorporação de componentes adicionais como módulos solares, circuitos de controle e sistemas de rastreamento de potência (MPPT) pode impactar negativamente o desempenho aerodinâmico e a estabilidade (Perez-Rosado *et al.*, 2015; Perez-Rosado; Bruck; Gupta, 2016);
- Desafios na seleção de materiais e morfologia: o uso de membranas flexíveis, materiais com anisotropia de rigidez ou dobradiças elásticas pode aprimorar a eficiência estrutural, mas dificulta o controle ativo e aumenta o risco de instabilidade (Mazaheri; Ebrahimi, 2010; Holness *et al.*, 2019);
- Gestão energética complexa: o voo oscilatório implica variação cíclica do consumo de energia, com picos de demanda durante fases de aceleração angular. Isso exige algoritmos avançados de controle e sistemas MPPT robustos, capazes de operar sob condições de irradiância não estacionárias (Liu *et al.*, 2018; Mamun *et al.*, 2022).

Embora os avanços em aerodinâmica, materiais e controle tenham impulsionado o desenvolvimento de VANTs bioinspirados, a integração eficiente de sistemas energéticos embarcados permanece um desafio em aberto. Em particular, a influência da cinemática oscilatória das asas sobre a geração fotovoltaica ainda é pouco compreendida, reforçando a necessidade de abordagens integradas que considerem simultaneamente dinâmica estrutural e eficiência energética.

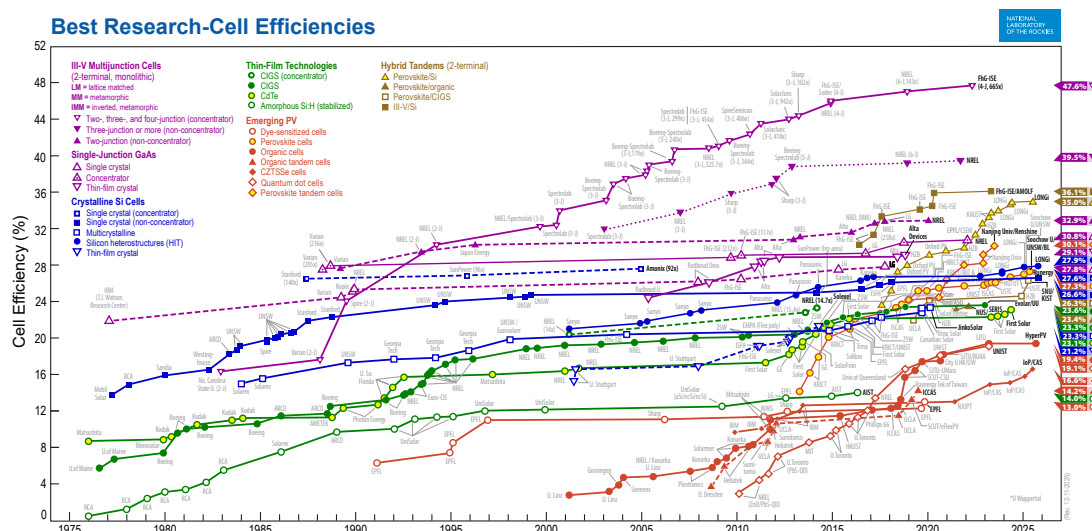
1.1.3 Geração de Energia Solar

A geração de energia solar em VANTs se baseia na incorporação de células fotovoltaicas diretamente à estrutura da aeronave, com o objetivo de ampliar a autonomia de voo por meio da conversão direta da radiação solar incidente em energia elétrica. Essa integração pode ser realizada por meio de células rígidas ou flexíveis, aplicadas a superfícies aerodinâmicas como asas e fuselagem.

O avanço recente das tecnologias fotovoltaicas, em especial as células de silício monocristalino com eficiência superior a 22%, bem como as promissoras células de perovskita e orgânicas flexíveis, tem viabilizado o uso de geradores solares em geometrias cada vez mais compactas e com elevado grau de integração estrutural (Sornek *et al.*, 2025; Liller *et al.*, 2025).

A eficiência global do sistema fotovoltaico embarcado não depende apenas do desempenho intrínseco das células, sendo fortemente influenciada por fatores externos como a incidência angular da radiação solar, a temperatura dos módulos, a disposição geométrica das superfícies e as condições ambientais variáveis ao longo do voo, os quais afetam diretamente a geração de potência útil. A Figura 2 apresenta um panorama das maiores eficiências de conversão confirmadas para diferentes tecnologias de células fotovoltaicas, evidenciando o progresso contínuo observado no setor.

Figura 2 – Maiores eficiências de conversão confirmadas para células fotovoltaicas.



Fonte: Adaptado de (NREL, 2025).

Estudos recentes indicam que modelos tradicionais de predição da captação solar frequentemente subestimam perdas associadas a variações do ângulo de incidência e da temperatura (Oettershagen, 2017). O autor indica que por meio do desenvolvimento de modelos de alta resolução foi possível reduzir o erro de predição para valores inferiores a 5%, em contraste com erros de até 18% observados em abordagens convencionais. Esse nível de precisão é crucial para estimar corretamente a autonomia energética da plataforma e dimensionar os componentes embarcados, como baterias e conversores.

Outro elemento fundamental para a otimização energética é o uso de circuitos de rastreamento do ponto de máxima potência. Esses sistemas ajustam continuamente a impedância de carga, de modo a maximizar a extração de potência mesmo diante de flutuações de irradiância ou temperatura. Holness, Bruck e Gupta (2018) demonstram que o uso de MPPT pode aumentar a energia útil extraída em até 24%, com impacto energético mínimo sobre o consumo próprio do sistema de controle.

Em VANTs de asa fixa, a arquitetura mais comum envolve a distribuição de módulos solares ao longo da superfície superior da asa, permitindo o voo contínuo durante o período diurno e a recarga de baterias para operação noturna. O exemplo mais emblemático dessa abordagem é

o *Airbus Zephyr*, que realizou um voo estratosférico contínuo por 67 dias, empregando células solares de arsenieto de gálio (GaAs) em conjunto com baterias de lítio-silício de alta densidade energética (AALTO, 2025).

À medida que se avança para plataformas de menor porte, o projeto aerodinâmico se torna mais sensível ao *trade-off* entre área útil de captação solar, coeficientes aerodinâmicos, massa adicional e rigidez estrutural. Em geral, configurações que priorizam a área solar tendem a penalizar a eficiência de voo, mas podem compensar ao fornecer maior autonomia energética para aplicações multifuncionais, como missões de longa duração ou em ambientes sem infraestrutura (Chu *et al.*, 2021; Dhafari *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024).

Nesse sentido, as células solares flexíveis, quando integradas a membranas aeronáuticas, oferecem a possibilidade de manter a conformidade aerodinâmica da estrutura, com redução do arrasto parasita. No entanto, ainda apresentam limitações quanto à durabilidade mecânica, sensibilidade à delaminação térmica e eficiência reduzida em comparação com células rígidas (Perez-Rosado *et al.*, 2015; Ionescu *et al.*, 2021). A fabricação de células ultrafinas em substratos maleáveis vem progressivamente atenuando essas desvantagens.

Em paralelo, novas estratégias de gerenciamento de energia têm sido propostas, como os algoritmos GEAC (*Greedy Energy-Aware Control*) e PEAC (*Predictive Energy-Aware Control*), que empregam lógica adaptativa para operar plataformas solares sem o uso de baterias, utilizando supercapacitores e controle preditivo em tempo real (Liller *et al.*, 2025). Embora essas técnicas ainda não tenham sido implementadas em veículos com asas oscilantes, representam um avanço conceitual relevante e aplicável a futuras versões bioinspiradas.

Entretanto, conforme demonstrado pelos próprios autores, o uso exclusivo de supercapacitores impõe limitações importantes, como a necessidade de pré-carga antes da decolagem, elevada sensibilidade a variações instantâneas de tensão sob cargas de pico e ocorrência potencial de eventos de *brownout* (queda momentânea da tensão de alimentação abaixo do nível mínimo de operação do sistema eletrônico), podendo levar à reinicialização do controlador de voo quando não acompanhados por estratégias de controle adequadas.

Por fim, a literatura recente evidencia que grande parte dos modelos de simulação ainda assume superfícies solares estáticas, desconsiderando os efeitos da oscilação aerodinâmica, da variação angular e das deformações estruturais. Essa simplificação pode resultar em erros significativos na previsão da geração real de energia em plataformas com asas móveis. Assim, torna-se imprescindível o desenvolvimento de modelos dinâmicos de predição que incorporem irradiância angular variável, geometria deformável e análise temporal contínua, especialmente no contexto de VANTs bioinspirados.

1.1.3.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico constitui o fenômeno físico fundamental responsável pela conversão direta da radiação solar em energia elétrica, estando na base do funcionamento das células solares. A compreensão desse processo é essencial para a análise da geração de potência embarcada

em veículos aéreos, especialmente sob condições dinâmicas de voo, como aquelas impostas por configurações com asas oscilantes, nas quais a incidência luminosa varia continuamente ao longo do tempo.

Observado originalmente em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel, o efeito fotovoltaico foi amplamente estudado ao longo do século XX, em paralelo aos avanços da física do estado sólido e à elucidação das propriedades eletrônicas dos materiais semicondutores.

O fenômeno ocorre quando fótons incidentes em um material com lacuna de energia adequada, como o silício, possuem energia suficiente para superar o chamado intervalo proibido de energia entre a banda de valência e a banda de condução. Esse intervalo funciona como um filtro, permitindo apenas a passagem (ou absorção) de fótons cuja energia seja suficientemente alta para excitar elétrons. Quando isso acontece, elétrons são promovidos para a banda de condução, formando pares elétron-lacuna que, sob a ação do campo elétrico interno da junção P-N, são separados e direcionados, gerando corrente elétrica quando o dispositivo está conectado a uma carga externa (Hudisteanu; Mateescu; Popovici, 2015; El-Basit; El-Maksood; Soliman, 2013; Messenger; Ventre, 2018).

Células solares são, portanto, tipicamente fabricadas a partir de materiais semicondutores, como silício cristalino, arseneto de gálio (GaAs) e telureto de cádmio (CdTe). A eficiência de conversão fotovoltaica depende diretamente das propriedades eletrônicas desses materiais e da qualidade da estrutura física da célula, incluindo parâmetros como espessura, dopagem, metalização e revestimentos antirreflexo (Al-Ezzi; Ansari, 2022).

No contexto de sistemas fotovoltaicos embarcados, particularmente em aplicações aeroespaciais e móveis, o desempenho é influenciado por variáveis adicionais, como temperatura, ângulo de incidência solar, sombreamento parcial e oscilações na orientação angular ao longo do voo.

Um componente indispensável para a eficiência em condições de operação variável é o sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Essa tecnologia busca, por meio de algoritmos de controle, manter a operação das células solares no ponto de maior extração de energia disponível, mesmo sob oscilações de irradiância ou temperatura, condição particularmente relevante em plataformas com asas móveis. Estudos demonstram que o uso de MPPT pode incrementar em até 24% a potência extraída em momentos de radiação intensa, com impacto energético desprezível no próprio consumo do sistema (Shiau *et al.*, 2009; Nguyen; Nguyen, 2015; Restrepo-Cuestas *et al.*, 2022).

Além disso, a temperatura dos módulos solares exerce influência direta sobre a eficiência de conversão. Em geral, o aumento da temperatura reduz a lacuna de energia efetivo do semicondutor, resultando em perda de desempenho elétrico. Estudos indicam que soluções como resfriamento passivo, otimização térmica de substratos e materiais com maior condutividade podem mitigar esse efeito, sendo particularmente relevantes em aeronaves, onde peso e volume são limitantes severos (Alsayid; Jallad, 2011; Mazhar; Shah, 2020).

Outro aspecto crítico se refere à ocorrência de sombreamento parcial e à orientação variável das superfícies solares, condições comuns em VANTs em manobra ou com asas móveis. Mo-

delagens recentes mostram que a introdução de células segmentadas e o uso de controladores adaptativos são estratégias promissoras para mitigar perdas de eficiência associadas a esse tipo de distúrbio (Benedict *et al.*, 2015).

O desenvolvimento de células solares flexíveis, baseadas em materiais como polímeros condutores, perovskitas ou substratos ultrafinos, tem ampliado as possibilidades de integração estrutural com superfícies curvas e móveis. Além da leveza e flexibilidade, essas células podem contribuir para a rigidez superficial e atuar como elementos multifuncionais (Bruck; Gupta, 2023).

Ainda, a captação de luz difusa vem sendo incorporada como alternativa para melhorar o desempenho em ambientes de baixa irradiância. A seleção de materiais com propriedades otimizadas de absorção e reflexão pode ampliar a geração em cenários adversos, como voo em ângulos desfavoráveis, nuvens ou sombreamento (Restrepo-Cuestas *et al.*, 2022).

Por fim, o avanço da tecnologia fotovoltaica está diretamente associado ao desenvolvimento de novos materiais e de sistemas de gerenciamento de energia mais eficientes e adaptativos. A integração de sensores e inteligência artificial em sistemas de captação e gerenciamento de energia pode revolucionar a forma como os dispositivos utilizam a luz solar.

Esses avanços, quando combinados a modelos que considerem explicitamente variações angulares, efeitos térmicos e condições dinâmicas de operação, têm potencial para ampliar significativamente o uso de sistemas fotovoltaicos em aplicações críticas, como VANTs bioinspirados (Nguyen; Nguyen, 2015; El-Basit; El-Maksood; Soliman, 2013).

1.1.4 Dinâmica de Asas Batentes

A dinâmica de asas oscilantes constitui um dos pilares teóricos e práticos para o desenvolvimento de VANTs bioinspirados. Essa dinâmica envolve a interação não linear entre fenômenos aerodinâmicos instáveis, flexibilidade estrutural e movimentos oscilatórios de grande amplitude, o que impõe desafios significativos à modelagem, ao controle e à otimização desses sistemas.

Os fundamentos experimentais e teóricos da propulsão por asas batentes remontam ao trabalho de DeLaurier (1993), que apresentou uma formulação analítica para estimativa simultânea de sustentação e propulsão em asas oscilantes flexíveis, considerando os efeitos de vórtice de esteira, devido a aerodinâmica instável de uma asa batente.

Posteriormente, foram conduzidos testes em túnel de vento e validações em voo de asa batente, demonstrando a viabilidade prática de configurações com batimento harmônico (Jones; Platzer, 1999). Esses estudos estabeleceram bases fundamentais para a modelagem moderna de asas batentes, especialmente no que diz respeito à interação entre flexibilidade estrutural e geração de forças aerodinâmicas não estacionárias.

Um estudo abrangente conduzido por Silva e Bueno (2024) empregou a formulação de coordenadas nodais absolutas (ANCF, do inglês *Absolute Nodal Coordinate Formulation*) em elementos de viga bidimensional, demonstrando que a flexibilidade da asa exerce influência significativa sobre a amplitude de oscilação, especialmente quando a frequência de excitação

coincide com modos ressonantes. O modelo demonstrou, ainda, que a energia mecânica pode ser otimizada por meio de estratégias de oscilação harmônica suave (SHF, do inglês *Smooth Harmonic Flapping*), maximizando o deslocamento estrutural sem estimular modos vibratórios indesejados – aspecto relevante para mitigar flutuações de orientação que poderiam comprometer a captação solar.

A literatura também evidencia que a introdução de acoplamentos entre flexão e torção nas asas pode otimizar simultaneamente os mecanismos de sustentação e propulsão. Kumar, Padhee e Samanta (2023), por meio do método de vórtices discretos em geometria tridimensional, analisaram quatro configurações: asas rígidas, curvadas, torcidas e curvado-torcidas. Os resultados demonstraram que a combinação entre curvatura e torção aumenta significativamente os coeficientes aerodinâmicos, sem provocar acréscimos relevantes de arrasto, sendo uma estratégia promissora para plataformas energeticamente eficientes.

Estudos anteriores também já indicavam a importância do acoplamento aeroelástico para otimização de desempenho. Kang *et al.* (2011) analisaram os efeitos da flexibilidade longitudinal, transversal e isotrópica na geração de força e na eficiência propulsiva de asas batentes, mostrando que a força propulsiva máxima é obtida quando o batimento ocorre próximo à ressonância, enquanto a eficiência propulsiva ótima é alcançada quando o batimento ocorre em cerca de metade da frequência natural.

No contexto da modelagem híbrida aeroestrutural, estudos propuseram modelos baseados em dados (*data-driven*), formulados no espaço de estados, capazes de prever forças aerodinâmicas ao longo do ciclo de batidas com elevada fidelidade (Bayiz; Cheng, 2021). Tal abordagem supera limitações dos modelos quase-estáticos, sendo fundamental para estimar com precisão a orientação instantânea das superfícies fotovoltaicas em VANTs com asas móveis – um parâmetro-chave para prever flutuações de irradiância incidente.

A área de controle dinâmico de asas batentes também tem avançado rapidamente, com a adoção de técnicas como aprendizado por reforço, controle adaptativo não linear e gêmeos digitais (*digital twins*). Foi demonstrado que esses sistemas oferecem maior robustez que os controladores clássicos, especialmente em regimes aerodinâmicos altamente não lineares (Poletti *et al.*, 2025). Isso permite ajustes ativos da frequência, amplitude e fase da batida, com o objetivo de otimizar simultaneamente a propulsão, a estabilidade e a exposição solar favorável ao longo do voo.

Do ponto de vista energético, estudos laboratoriais indicam que configurações com asas batentes podem reduzir em até 47% o consumo de energia durante o voo de cruzeiro, quando comparadas a rotores fixos (Tapia *et al.*, 2023). Esse ganho decorre da capacidade de planar em fases do ciclo de voo, minimizando a demanda propulsiva. Dado que a orientação angular da asa durante o planeio tende a ser mais estável, essa fase também pode ser estratégica para maximizar a captação de energia solar.

Por outro lado, uma parcela significativa dos estudos ainda se restringe a modelagens bidimensionais e simulações isoladas em túneis de vento. No entanto, abordagens mais recentes

com controladores adaptativos, baseados em técnicas de inteligência artificial, e simulações tridimensionais com o método UVLM (*Unsteady Vortex Lattice Method*), têm ampliado o grau de realismo nas previsões (Martinez-Ponce *et al.*, 2024).

Apesar desses avanços, permanece limitada a literatura que integra explicitamente a dinâmica de batidas com a modelagem da captação fotovoltaica embarcada. As contribuições existentes, em geral, baseiam-se em estimativas médias ou simplificações estáticas, o que ressalta a necessidade de modelos mais realistas que incorporem efeitos dinâmicos, amortecimento estrutural, modos vibratórios superiores e variações temporais da orientação solar.

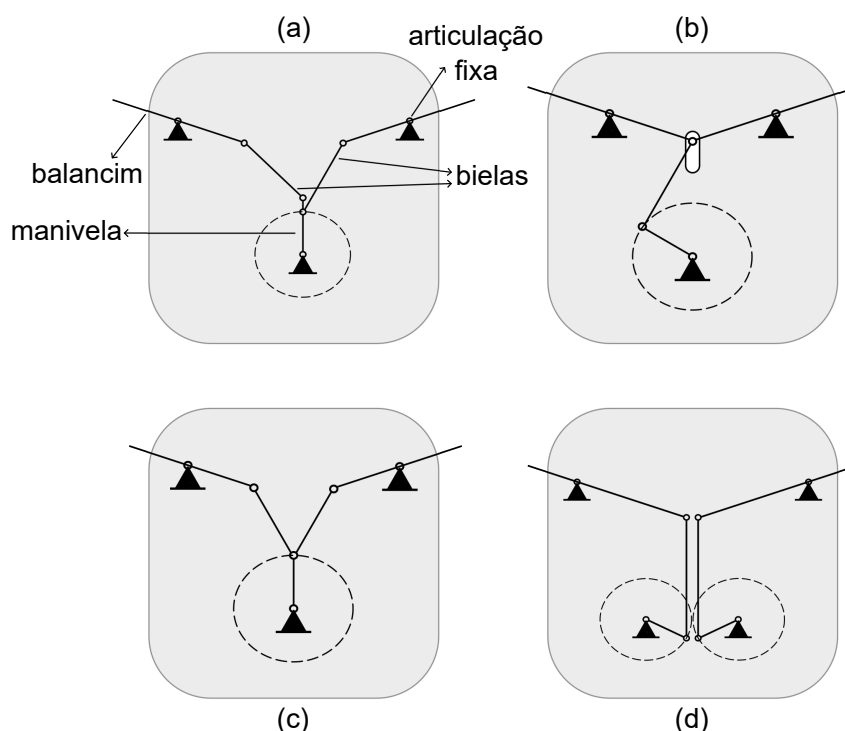
1.1.4.1 Mecanismos de Batidas de Asa

O desenvolvimento de mecanismos de batidas de asa em VANTs bioinspirados se baseia na replicação mecânica de movimentos observados em aves e insetos, com o objetivo de alcançar maior eficiência aerodinâmica, manobrabilidade e capacidade de sustentação em voo oscilatório. O projeto bioinspirado tem incorporado articulações dinâmicas capazes de ajustar o ângulo de ataque em tempo real ao longo do ciclo de batidas, permitindo controle aerodinâmico mais refinado e contribuindo para a estabilidade em regimes de voo não convencionais.

Além da mobilidade ativa, avanços recentes incluem a integração de sensores e atuadores embarcados, bem como a implementação de sistemas de isolamento vibracional – frequentemente baseados no uso de mancais de precisão – com o objetivo de aumentar a vida útil dos mecanismos e reduzir cargas indesejadas nas juntas e conexões estruturais. Configurações com múltiplas articulações, atualmente em estudo, visam simular movimentos orgânicos por meio da introdução de graus de liberdade adicionais. Paralelamente, investigações têm explorado o uso de materiais piezelétricos, os quais permitem a conversão de energia mecânica em elétrica durante o movimento oscilatório, criando oportunidades para sistemas auxiliares de geração energética.

Em sua essência, o movimento de batidas de asas é viabilizado por mecanismos capazes de converter o movimento rotacional contínuo, proveniente de motores, em movimento oscilatório alternado. A literatura apresenta uma variedade de arquiteturas mecânicas, com diferentes graus de complexidade, desempenho energético e estabilidade. As principais configurações encontram-se ilustradas na Figura 3.

Figura 3 – Ilustração de mecanismos de batidas de asa.



Legenda: (a) mecanismo de manivela escalonada; (b) mecanismo deslizante de manivela única; (c) mecanismo de manivela única e balancim duplo; (d) mecanismo de manivela dupla e balancim duplo.

Fonte: Próprio autor.

O mecanismo de manivela escalonada, exemplificado na Figura 3a, é notável por sua simplicidade construtiva. Consiste em barras de ligação configuradas com diferentes ângulos e comprimentos, gerando batidas simétricas das asas. Embora eficiente para baixas frequências, apresenta limitações quanto à precisão e sincronização em regimes de alta velocidade, além de suscetibilidade a instabilidades mecânicas.

O mecanismo deslizante de manivela única (Figura 3b), utiliza um ponto central de ligação entre a biela e as asas, promovendo movimento por expansão e contração. Sua geometria compacta favorece aplicações em VANTs de pequeno porte, porém o aumento do atrito cinemático em altas frequências pode induzir desgaste acelerado e falhas estruturais.

Como alternativa, o mecanismo de manivela única e balancim duplo, ilustrado na Figura 3c, adota sistemas de quatro barras independentes, proporcionando maior eficiência energética, controle de batida e ajuste dinâmico da amplitude angular. Essa configuração, entretanto, exige maior número de componentes, aumentando a complexidade de montagem e calibração.

O mecanismo de manivela dupla e balancim duplo (Figura 3d) se destaca por sua sincronização precisa entre as asas, sendo ideal para configurações que requerem elevada estabilidade lateral e simetria de movimento. Contudo, seu peso estrutural adicional e maior consumo energético tornam sua aplicação menos atrativa em VANTs de escala reduzida ou sensíveis à carga útil.

Por fim, o mecanismo de eixo transversal, apresentado na Figura 4, é empregado em plataformas de maior envergadura. Essa configuração permite batimento simétrico com torque distribuído entre os lados, favorecendo a estabilidade estrutural de asas amplas. Em contrapartida, apresenta alta complexidade mecânica, peso adicional e maior exigência de torque, o que limita sua aplicação em plataformas leves ou miniaturizadas (Srigrarom; Chan, 2015).

Figura 4 – Mecanismo de eixo transversal.



Fonte: Reproduzido de Srigrarom e Chan (2015).

Cada uma dessas arquiteturas representa uma solução funcional com trade-offs específicos em termos de eficiência energética, simplicidade construtiva, robustez mecânica e adaptabilidade a diferentes escalas e missões. No contexto deste trabalho, tais escolhas assumem relevância adicional, uma vez que a frequência, a amplitude e a estabilidade do batimento influenciam diretamente a orientação angular das superfícies solares e, consequentemente, a eficiência da geração fotovoltaica embarcada.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A literatura científica contemporânea evidencia uma lacuna metodológica e conceitual relevante no que se refere à integração entre a dinâmica oscilatória de voo de VANTs bioinspirados e a eficiência de sistemas fotovoltaicos embarcados. Enquanto estudos consolidados exploram, de forma isolada, os fenômenos aerodinâmicos associados ao batimento de asas (Sane, 2003; Shyy *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2018; Ma; Zhu; Zhou, 2019) são escassos os trabalhos que abor-

dam, de maneira quantitativa, analítica e experimental, o impacto da cinemática angular das asas sobre a geração elétrica fotovoltaica.

Este hiato revela um desalinhamento entre duas áreas de pesquisa que, se conectadas de forma eficaz, podem conduzir a avanços tecnológicos significativos: a biomecânica do voo oscilatório e a engenharia de sistemas energéticos embarcados. A variação transiente da irradiação recebida pelas superfícies solares – como consequência direta da cinemática não linear das asas – invalida modelos tradicionais de captação baseados em painéis solares estáticos. Ao ignorar essas flutuações dinâmicas, incorre-se no risco de erros sistemáticos na estimativa da autonomia energética, o que pode comprometer o dimensionamento do sistema, a eficiência do gerenciamento de potência e a confiabilidade da missão.

Nesse contexto, a questão científica central que orienta esta dissertação consiste em compreender como o movimento oscilatório das asas afeta a eficiência da geração de potência elétrica por células solares embarcadas. Responder a essa pergunta requer uma abordagem multifacetada que combine modelagem numérica da cinemática angular das asas, simulações computacionais de incidência solar variável ao longo do ciclo de voo e ensaios experimentais em bancada capazes de isolar e quantificar o impacto dos parâmetros oscilatórios – como frequência, amplitude e orientação angular – na eficiência fotovoltaica.

A contribuição científica almejada é duplamente relevante: por um lado, avança a compreensão fundamental do acoplamento entre dinâmica estrutural e eficiência energética; por outro, fornece subsídios práticos para o projeto de VANTs energeticamente autônomos, com aplicação em missões de longa duração, em regiões remotas ou de difícil acesso.

Adicionalmente, o trabalho se alinha a demandas globais por tecnologias limpas e eficientes, reforçando os compromissos dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente, ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ao fomentar inovações em sistemas solares embarcados e ODS 9 Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao propor soluções técnicas viáveis para veículos autônomos de próxima geração.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo central desta pesquisa é avaliar, de forma quantitativa e experimental, o impacto da cinemática de batimento de asas na eficiência da geração de potência elétrica por células solares integradas a VANTs bioinspirados. Para isso, propõe-se uma abordagem que combina modelagem computacional, simulações numéricas e ensaios experimentais. Especificamente, busca-se:

- Analisar o efeito da dinâmica oscilatória das asas sobre a eficiência da conversão fotovoltaica ao longo do ciclo de voo, considerando diferentes regimes de frequência e amplitude;

- Projetar e construir um protótipo de VANT bioinspirado, tomando como referência morfológica a arara-canindé, com asas articuladas que reproduzam o batimento natural e que permitam a integração de células solares;
- Desenvolver um sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) adaptado às variações rápidas de irradiância induzidas pela cinemática das asas, de modo a maximizar a eficiência na extração de energia elétrica.

1.4 PRINCIPAIS RESULTADOS ALCANÇADOS

- Desenvolvimento de um modelo numérico integrado capaz de correlacionar a cinemática de batimento de asas com a variação temporal da irradiância solar incidente e da potência elétrica gerada;
- Demonstração, por meio de simulações e ensaios experimentais, de que o movimento oscilatório das asas provoca alteração na potência fotovoltaica gerada, com magnitude dependente da amplitude e da frequência de batimento;
- Validação experimental da influência da variabilidade angular na geração elétrica, evidenciando diferenças significativas entre os regimes estacionário e oscilatório;
- Elaboração, publicação e divulgação de material audiovisual de caráter técnico-científico, destinado à comunicação e difusão dos resultados do projeto ao público geral, disponível no endereço eletrônico: <https://www.youtube.com/watch?v=1vu0VfEgWTo>.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além desta introdução, esta dissertação está estruturada em quatro capítulos, sendo os demais organizados da seguinte forma:

- **Capítulo 2 - Metodologia:** descreve os métodos adotados para modelagem dinâmica das asas, o esquema da bancada experimental, o projeto do VANT e do sistema MPPT e os critérios de validação.
- **Capítulo 3 - Resultados e Discussão:** apresenta e analisa os principais resultados obtidos, tanto das simulações quanto dos ensaios experimentais. Compara diferentes configurações e regimes de batimento e suas implicações na captação de energia solar, discutindo relações com a literatura existente.
- **Capítulo 4 - Considerações Finais:** apresenta as conclusões gerais da pesquisa, suas contribuições técnicas e científicas, limitações identificadas e sugestões para desdobramentos futuros.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa adotou uma abordagem metodológica híbrida, que integra modelagem computacional, simulações numéricas e experimentação física com o objetivo de investigar os efeitos da dinâmica de batimento de asas na eficiência de geração de potência elétrica por células solares embarcadas em VANTs bioinspirados.

A premissa central da investigação reside na hipótese de que a orientação angular das superfícies solares durante o ciclo oscilatório das asas altera significativamente a irradiância solar efetiva incidente nas células fotovoltaicas, impactando diretamente a potência elétrica convertida. Para abordar esse fenômeno de forma sistemática e replicável, a metodologia foi estruturada em três etapas principais: modelagem e simulação computacional, ensaio experimental em bancada e análise comparativa.

A primeira fase consistiu no desenvolvimento de um modelo numérico da dinâmica estrutural de uma asa oscilante, idealizada como uma viga de Euler-Bernoulli engastada em uma extremidade, submetida a uma excitação rotacional harmônica na base. A discretização da equação de movimento foi realizada por meio do método dos Elementos Finitos (MEF) com vinte elementos igualmente espaçados, e a integração temporal foi conduzida via método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Esse modelo permitiu a reconstrução da geometria deformada da asa em tempo real e o cálculo da orientação angular instantânea de cada segmento ao longo do ciclo de batimento. A partir disso, foi estimada a irradiância solar efetiva projetada sobre blocos de células fotovoltaicas distribuídas na asa, considerando a interação entre o vetor normal da superfície e o vetor solar incidente, definido pelas coordenadas solares (altitude e azimuth). Diversas combinações de frequência e amplitude angular foram simuladas, permitindo o mapeamento da influência cinemática sobre a variação temporal da geração de potência elétrica.

Na segunda etapa, foi construída uma bancada experimental em ambiente externo, capaz de reproduzir o movimento de batimento de asas por meio de um mecanismo oscilatório acionado por motor elétrico, com controle de frequência e amplitude. Células solares foram acopladas a uma estrutura rígida móvel, permitindo a condução de ensaios sob duas condições principais:

- **Estacionária:** células fixas e orientadas de forma ideal ao sol, representando o cenário de máxima captação sem movimento;
- **Oscilatória:** células submetidas ao movimento oscilatório, reproduzindo voo estacionário de uma asa batente.

A aquisição de dados foi realizada com um sistema embarcado baseado em Arduino, responsável por medir em tempo real a tensão (via divisor resistivo) e a corrente (via resistor *shunt*).

Os dados foram processados e transmitidos para um computador via interface serial, permitindo o cálculo da potência elétrica instantânea, conforme a relação $P(t) = V(t)I(t)$. A taxa de amostragem de 10 Hz assegurou a captura adequada dos efeitos oscilatórios sobre a potência gerada.

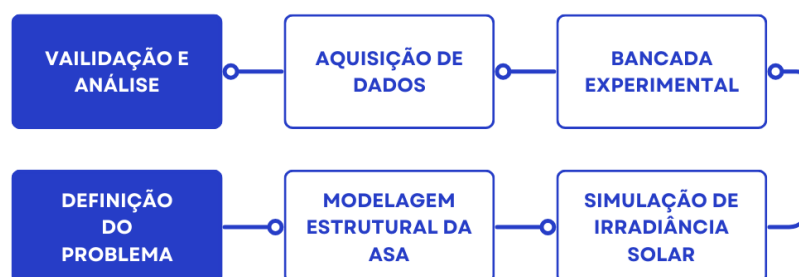
As condições ambientais durante os ensaios foram monitoradas e registradas, incluindo irradiação, temperatura, umidade e temperatura da superfície da célula solar. As condições de oscilação adotadas (amplitude de 30° e frequência de 2π rad/s) foram escolhidas para representar regimes típicos de VANTs bioinspirados de porte médio.

A última etapa consistiu na análise integrada dos resultados simulados e experimentais, com o objetivo de:

- Validar o modelo computacional quanto à coerência com os dados obtidos em bancada;
- Quantificar a influência do movimento oscilatório na potência elétrica gerada;
- Avaliar tendências dinâmicas e comportamento cíclico da geração elétrica sob diferentes regimes.

Essa integração assegura consistência entre a modelagem teórica e o comportamento físico real, permitindo extrair conclusões com base em múltiplas fontes de dados. A metodologia é ilustrada na Figura 5, que apresenta o fluxograma da abordagem adotada na pesquisa. Inicialmente, parte-se da definição do problema, etapa na qual são estabelecidos os objetivos do estudo e delimitadas as hipóteses e variáveis de interesse relacionadas à geração de potência elétrica em VANTs bioinspirados com células solares.

Figura 5 – Fluxograma da abordagem metodológica adotada na pesquisa.



Fonte: Próprio autor.

Na sequência, desenvolve-se a modelagem estrutural da asa, considerando suas características geométricas e propriedades mecânicas, fundamentais para a representação do movimento de batimento. Com base nesse modelo, realiza-se a simulação da irradiação solar incidente, incorporando os efeitos da orientação e do movimento da asa sobre a captação energética.

Paralelamente, conduz-se a etapa de aquisição de dados, associada à bancada experimental, na qual são realizados os ensaios para validação dos modelos propostos. Essa etapa permite

comparar os resultados simulados com dados experimentais, possibilitando a validação e análise do desempenho do sistema sob diferentes condições operacionais.

2.1 MODELAGEM DINÂMICA

2.1.1 Captação de Energia Solar

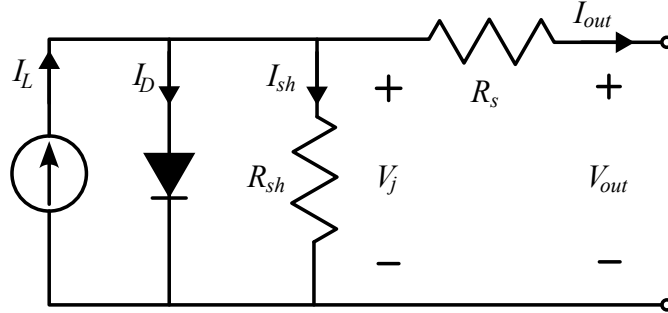
A conversão da radiação solar em energia elétrica é governada por dois aspectos fundamentais: o comportamento eletro-físico intrínseco das células solares e as condições geométricas e ambientais sob as quais ocorre a incidência da luz. No contexto desta pesquisa, ambos os aspectos são abordados por meio de modelagem matemática e simulação computacional, visando estimar com precisão a potência gerada em estruturas oscilantes.

2.1.1.1 Modelo Elétrico da Célula Solar

O comportamento elétrico de uma célula solar pode ser descrito de forma consistente por meio de um modelo de circuito equivalente baseado na junção P-N semicondutora. Entre os modelos disponíveis na literatura, o modelo de fonte de corrente em paralelo com um diodo é amplamente adotado por sua capacidade de representar, com boa precisão, os principais fenômenos físicos envolvidos na conversão fotovoltaica (Evro; Wade; Tomomewo, 2023). Esse modelo é particularmente adequado para análises sob condições variáveis de irradiância e temperatura, como aquelas encontradas em aplicações aeroespaciais.

No modelo ideal, conforme representado na Figura 6, a célula solar é representada por uma fonte de corrente fotogerada I_L , cuja magnitude é proporcional à irradiância incidente, conectada em paralelo a um diodo, cuja corrente I_D modela os mecanismos de recombinação de portadores na junção P-N. Para contabilizar as perdas resistivas inerentes ao dispositivo real, são incluídos dois elementos adicionais: uma resistência de derivação (ou *shunt*) R_{sh} , associada a caminhos alternativos de corrente e defeitos do material, e uma resistência em série R_s , que representa perdas ôhmicas nos contatos metálicos e no material semicondutor.

Figura 6 – Circuito equivalente de uma célula solar, sendo I_L a corrente fotogerada, I_D a corrente do diodo, I_{sh} a corrente de fuga através do resistor *shunt*, I_{out} a corrente de saída da célula solar, R_{sh} a resistência *shunt*, R_s a resistência em série, V_j a tensão elétrica na junção semicondutora e V_{out} a tensão elétrica nos terminais externos.



Fonte: Próprio autor.

Esses elementos são tratados como concentrados (*lumped elements*), uma vez que suas dimensões físicas são significativamente menores do que o comprimento de onda associado aos sinais elétricos envolvidos, permitindo a modelagem do sistema sem a necessidade de considerar efeitos de propagação ou variação de fase ao longo dos componentes (Lorenzo, 1994). A aplicação da Lei de Kirchhoff das correntes ao circuito equivalente conduz à expressão da corrente de saída da célula (I_{out}) (Luque; Hegedus, 2003).

$$I_{out} = I_L - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

onde I_{sh} é a corrente de fuga através da resistência de derivação.

A tensão na junção semicondutora, comum ao diodo e ao resistor *shunt*, pode ser expressa como:

$$V_j = V_{out} + I_{out} R_s \quad (2)$$

sendo V_{out} a tensão nos terminais externos da célula. A corrente de fuga através do resistor de derivação (I_{sh}) segue a Lei de Ohm, resultando em:

$$I_{sh} = \frac{V_j}{R_{sh}} \quad (3)$$

A corrente que atravessa o diodo é descrita pela equação de Shockley (Shockley, 1949):

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{V_j}{n V_T} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

em que I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo, associada à difusão de portadores minoritários a partir das regiões neutras para a região de depleção. O parâmetro n é o fator de idealidade do diodo ($1 \leq n \leq 2$ para dispositivos reais), V_T é a tensão térmica, definida como $V_T = \frac{kT}{q}$, k é a constante de Boltzmann, q é a carga elementar do elétron e T é a temperatura

absoluta.

Substituindo as equações 2, 3 e 4 na Equação 1, obtém-se a equação característica da célula solar:

$$I_{out} = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{out} + I_{out} R_s}{n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{out} + I_{out} R_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

Para células solares de alta qualidade, nas quais $R_{sh} \gg R_s$, o termo associado à resistência de derivação pode ser desprezado, simplificando a equação para:

$$I_{out} = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{out} + I_{out} R_s}{n V_T} \right) - 1 \right] \quad (6)$$

Note que não se considera uma equação diferencial para descrever o comportamento elétrico do sistema fotovoltaico, pois assume-se neste trabalho que a constante de tempo do sistema térmico é superior a do sistema estrutural, levando portanto à uma resposta térmica mais lenta.

Prosseguindo, a corrente elétrica de saturação reversa do diodo apresenta forte dependência com a temperatura e pode ser modelada por:

$$I_0(T) = I_0 \left(\frac{T}{T_{nom}} \right)^3 \exp \left[\frac{E_g}{n V_T} \left(\frac{1}{T_{nom}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (7)$$

em que T_{nom} é a temperatura nominal e E_g é a energia de *bandgap* do material semiconductor.

A corrente fotogerada é proporcional à irradiância incidente G e varia com a temperatura da célula, sendo expressa por:

$$I_L = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \frac{G}{1000} \quad (8)$$

onde I_{sc} é a corrente de curto-circuito na condição padrão, G é a irradiância em W/m^2 e K_i é o coeficiente térmico da corrente de curto-circuito, indicando a variação da corrente I_{sc} em função da temperatura da célula. Esse coeficiente é geralmente fornecido pelo fabricante e permite incorporar efeitos térmicos na modelagem elétrica. O aumento da temperatura da célula resulta, de modo geral, em redução da tensão de circuito aberto e aumento marginal da corrente de curto-circuito.

Como uma potência elétrica útil é obtida apenas por meio da associação de múltiplas células, a equação da corrente de saída de um módulo fotovoltaico composto por N_s células em série e N_p em paralelo pode ser escrita como:

$$I_{out} = N_p I_L - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{out} + I_{out} R_s}{N_s n V_T} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

Em condição de circuito aberto ($I_{out} = 0$), a tensão elétrica nos terminais da célula define a tensão elétrica de circuito aberto V_{oc} , que, desprezando-se o efeito da resistência de derivação,

pode ser expressa como:

$$V_{oc} = \frac{n k T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (10)$$

Por outro lado, em condição de curto-circuito ($V_{out} = 0$), a corrente elétrica que flui pelos terminais define a corrente de curto-circuito I_{sc} , que, para células de alta qualidade (baixo R_s e I_0 , e elevado R_{sh}), pode ser aproximada por:

$$I_{sc} \approx I_L \quad (11)$$

A análise dessas expressões permite a construção das curvas características $I-V$ e $P-V$, fundamentais para a identificação do ponto de máxima potência e para o desenvolvimento de estratégias de rastreamento do ponto de máxima potência. Em aplicações dinâmicas, como a dos VANTs bioinspirados, variações de irradiância, inclinação e temperatura podem induzir flutuações rápidas nesses parâmetros, tornando indispensável o uso de técnicas adaptativas de gerenciamento energético (Petreus; Farcas; Ciocan, 2008; Shiau *et al.*, 2009; Hudisteanu; Mateescu; Popovici, 2015; Zhang; Hu, 2016; El-Basit; El-Maksood; Soliman, 2013; Liu *et al.*, 2018; Lima; Gonçalves, 2018; Muraleedharan *et al.*, 2020; Mamun *et al.*, 2022).

2.1.1.2 Modelagem Vetorial de Incidência Solar

Para quantificar a potência gerada em estruturas móveis, é necessário modelar a interação entre a orientação da superfície fotovoltaica e o vetor de incidência solar. A irradiância efetiva sobre uma célula depende do ângulo entre o vetor normal à superfície da asa e o vetor da radiação solar no referencial global terrestre (Holness *et al.*, 2019).

Para tal, considera-se uma área A_1 ocupada por módulos solares de eficiência η , submetida a um fluxo solar Φ e define-se o vetor unitário de radiação solar $\hat{\mathbf{n}}_{\text{Sol}}^{\{W\}}$ no referencial inercial terrestre, construído a partir dos ângulos astronômicos de altitude (α) e azimuth (γ) do Sol.

$$\hat{\mathbf{n}}_{\text{Sol}}^{\{W\}} = \begin{bmatrix} \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ \sin(\alpha) \sin(\gamma) \\ \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde α e β são, respectivamente, o ângulo de altitude e azimuth do sol. Estes valores podem ser estimados com base em modelos astronômicos de posição solar em função da latitude, hora do dia e data do ano. Simultaneamente, para a região de interesse fotovoltaica, calcula-se o vetor normal local à superfície da asa ($\hat{\mathbf{n}}_{\text{asa}}^{\{B\}}$), no referencial do corpo.

$$\hat{\mathbf{n}}_{\text{asa}}^{\{B\}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (13)$$

onde $\varphi(t)$ é o ângulo de batimento da asa, assumindo que a superfície da asa se mantém apro-

ximadamente plana no nível do elemento, hipótese coerente com o regime de deformação moderada verificado experimentalmente em asas batentes construídas em materiais compostos ou películas flexíveis de baixa espessura.

Para realizar a transformação entre referenciais, empregam-se as matrizes de rotação associadas aos ângulos de rolamento (ϕ), arfagem (ϑ) e guinada (ψ):

$$\hat{\mathbf{n}}_{asa}^{\{W\}} = \mathbf{R}_z(\psi)\mathbf{R}_y(\vartheta)\mathbf{R}_x(\phi)\hat{\mathbf{n}}_{asa}^{\{B\}} \quad (14)$$

em que:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x(\phi) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_y(\vartheta) &= \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & 0 & \sin(\vartheta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\vartheta) & 0 & \cos(\vartheta) \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z(\psi) &= \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

Assim, a potência incidente P em cada área ativa é dada por:

$$P = \Phi \hat{\mathbf{n}}^{\{W\}} \bullet \eta A_1 \hat{\mathbf{n}}_1^{\{W\}} \quad (16)$$

Esse modelo vetorial permite mapear a potência gerada ao longo do ciclo de batimento, considerando alterações contínuas da orientação da asa. Ao assumir simetria no movimento das asas esquerda e direita ($\varphi_L = -\varphi_R$), a potência total gerada é dada por:

$$P_{\text{gen}} = \Phi \eta \frac{A}{2} \left[\left(\hat{\mathbf{n}}^{\{W\}} \bullet \hat{\mathbf{n}}_{asa_L}^{\{W\}} \right) + \left(\hat{\mathbf{n}}^{\{W\}} \bullet \hat{\mathbf{n}}_{asa_R}^{\{W\}} \right) \right] \quad (17)$$

Por fim, a eficiência fracional da captação pode ser expressa como:

$$g_f = \frac{1}{2} \left[\left(\hat{\mathbf{n}}^{\{W\}} \bullet \hat{\mathbf{n}}_{asa_L}^{\{W\}} \right) + \left(\hat{\mathbf{n}}^{\{W\}} \bullet \hat{\mathbf{n}}_{asa_R}^{\{W\}} \right) \right] \quad (18)$$

Para projetar cenários realistas e garantir margem de segurança contra flutuações de ângulo de ataque, amplitude de batimento ou sombreamento parcial, adota-se um fator de segurança de 1,25. Este fator implica assumir que apenas 80% da irradiância prevista está efetivamente disponível:

$$P_{\text{gen, seguro}} = \frac{\eta g_f \Phi A}{1,25} \quad (19)$$

A integração de células solares em superfícies flexíveis requer estratégias de modelagem

vetorial que considerem a cinemática local da estrutura, como implementado nesta pesquisa. O movimento angular de estruturas móveis pode tanto prejudicar quanto otimizar a geração de energia, a depender da frequência de batida, amplitude, geometria da asa e trajetória solar (Duffie; Beckman, 2013; Zhang; Hu, 2016; Liu *et al.*, 2018; Mamun *et al.*, 2022).

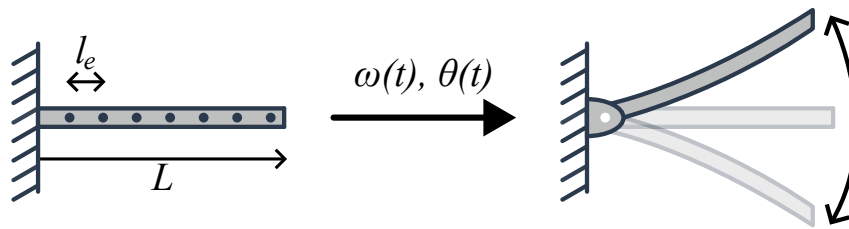
2.1.2 Modelo Computacional Integrado

O modelo computacional desenvolvido nesta pesquisa fundamenta-se em uma abordagem integrada para a análise da dinâmica estrutural de asas batentes e sua influência direta na captação de energia solar. A formulação adota como base a teoria clássica de vigas de Euler-Bernoulli, amplamente empregada na modelagem de estruturas submetidas a flexão predominante, sob a hipótese de pequenas deformações e rotações moderadas (Timoshenko, 1983; Gere; Goodno, 2012).

A estratégia de modelagem é composta por três etapas principais: (i) discretização estrutural da asa por meio do método dos Elementos Finitos, (ii) solução temporal da resposta dinâmica via integração numérica no domínio do tempo e (iii) acoplamento cinemático direto com o modelo vetorial de captação solar, permitindo a avaliação instantânea da potência fotovoltaica ao longo do movimento.

A estrutura da asa é representada como uma viga unidimensional de Euler-Bernoulli, discretizada em elementos finitos com dois graus de liberdade por nó: deslocamento transversal (ω) e rotação angular (θ), conforme Figura 7.

Figura 7 – Esquema da representação da asa como uma viga de Euler-Bernoulli.



Fonte: Próprio autor.

A partir das propriedades geométricas e materiais da seção transversal, constroem-se as matrizes elementares de rigidez $\mathbf{K}$ e de massa $\mathbf{M}$ (Cook *et al.*, 2001).

$$\mathbf{K} = \frac{EI}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 \\ -12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{M} = \frac{\rho A l_e}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l_e & 54 & -13l_e \\ 22l_e & 4l_e^2 & 13l_e & -3l_e^2 \\ 54 & 13l_e & 156 & -22l_e \\ -13l_e & -3l_e^2 & -22l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

onde E é o módulo de elasticidade, I o momento de inércia da seção, ρ a densidade do material, A a área da seção transversal e l_e o comprimento do elemento. Note que o amortecimento estrutural é negligenciado. Entretanto, dependendo do nível de flexibilidade estrutural e das amplitudes de oscilação consideradas, mecanismos dissipativos associados a efeitos aeroelásticos, atrito estrutural e amortecimento material podem se tornar relevantes, podendo inclusive introduzir comportamentos não lineares na resposta dinâmica do sistema. Dessa forma, a inclusão de termos de amortecimento constitui uma possível extensão do modelo proposto, podendo ser investigada em trabalhos futuros.

O processo de montagem global resulta nas matrizes de rigidez e massa do sistema estrutural completo. Para representar o batimento da asa, impõe-se uma condição de engaste na raiz, com deslocamento transversal nulo e rotação angular prescrita no primeiro nó. Essa rotação é definida como uma função harmônica no tempo, suavizada nos instantes iniciais para evitar excitações abruptas (Hazimeh *et al.*, 2020):

$$\theta_1(t) = A_\theta \sin(\omega_\theta t) S_2\left(\frac{t}{T_{\text{smooth}}}\right) \quad (22)$$

em que A_θ é a amplitude angular, ω_θ a frequência de excitação e $S_2(\cdot)$ uma função de suavização do tipo *smootherstep*, definida por:

$$S_2(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 6x^5 - 15x^4 + 10x^3, & 0 \leq x \leq 1 \\ 1, & x > 1 \end{cases} \quad (23)$$

Após a aplicação das condições de contorno, o sistema dinâmico é particionado em graus de liberdade prescritos e livres, resultando na equação de movimento para os graus de liberdade livres:

$$\mathbf{M}_{ll} \ddot{\mathbf{u}}_l + \mathbf{K}_{ll} \mathbf{u}_l = -\mathbf{M}_{lm} \ddot{\theta}_1(t) - \mathbf{K}_{lm} \theta_1(t) \quad (24)$$

onde os subscritos l e m denotam, respectivamente, os graus de liberdade livres e o grau de liberdade associado ao movimento imposto na raiz.

Para a solução numérica no domínio do tempo, o sistema é reescrito em forma de espaço de estados, definindo-se o vetor de estado:

$$\mathbf{x}(t) = \{\dot{\mathbf{u}}_l \ \mathbf{u}_l\}^T \quad (25)$$

de modo que a equação diferencial de primeira ordem assume a forma:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B}(t) \quad (26)$$

em que a matriz $\mathbf{A}$ contém as relações entre massa e rigidez do sistema, enquanto o vetor $\mathbf{B}(t)$ incorpora os efeitos do movimento prescrito na base.

A integração temporal é realizada por meio do método clássico de Runge-Kutta de quarta ordem, que fornece elevada precisão e estabilidade para problemas dinâmicos estruturais. A atualização do vetor de estado em cada passo de tempo é dada por:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \frac{\Delta t}{6} (\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4) \quad (27)$$

onde:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_1 &= f(\mathbf{x}_i, t_i) \\ \mathbf{k}_2 &= f\left(\mathbf{x}_i + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{k}_1, t_i + \frac{\Delta t}{2}\right) \\ \mathbf{k}_3 &= f\left(\mathbf{x}_i + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{k}_2, t_i + \frac{\Delta t}{2}\right) \\ \mathbf{k}_4 &= f(\mathbf{x}_i + \Delta t \mathbf{k}_3, t_i + \Delta t) \end{aligned} \quad (28)$$

em que os incrementos intermediários $\mathbf{k}_1$ a $\mathbf{k}_4$ são obtidos a partir das avaliações sucessivas da função dinâmica do sistema (Butcher, 2008).

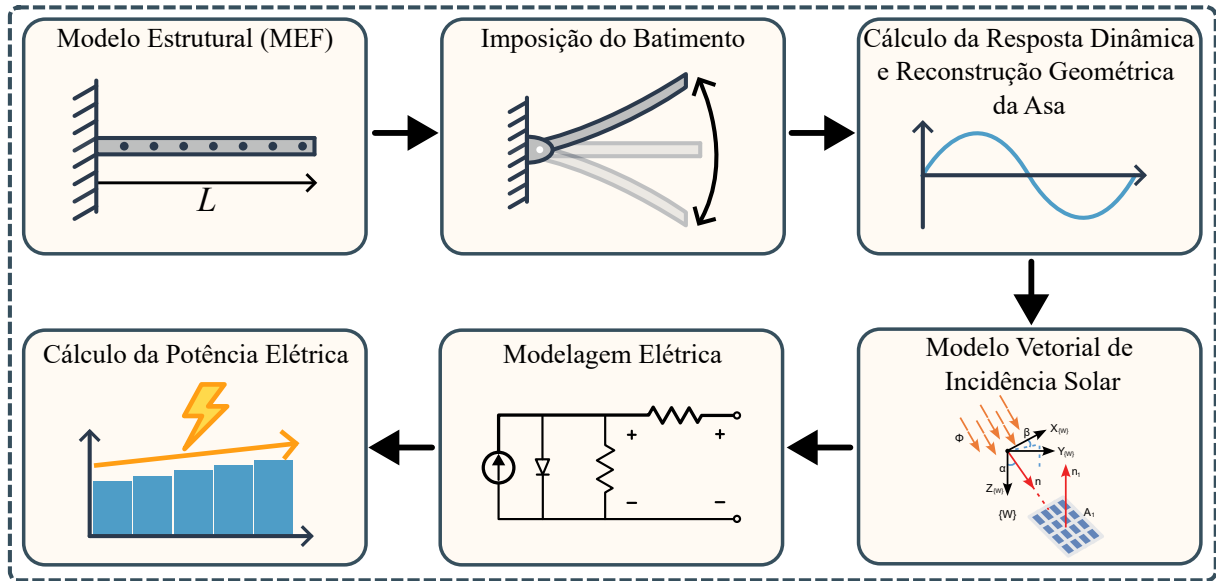
O diferencial da abordagem proposta reside no acoplamento direto entre a resposta dinâmica da estrutura e o modelo de captação solar. A cada instante de tempo, a rotação local dos elementos estruturais é utilizada para determinar a orientação dos painéis fotovoltaicos associados. A partir da deformada instantânea, calcula-se o vetor normal local de cada elemento ativo, o qual é transformado para o referencial inercial do Sol por meio de rotações compostas. A potência elétrica gerada é então avaliada com base no produto escalar entre o vetor normal do painel e o vetor de incidência solar.

Essa formulação integrada permite quantificar, de forma consistente, a influência da cinemática do batimento – incluindo amplitude, frequência e distribuição espacial dos elementos – sobre a eficiência de geração fotovoltaica, constituindo a base para as análises paramétricas e espectrais apresentadas nos capítulos subsequentes.

Vale ressaltar que na modelagem teórica, a célula solar é considerada como elemento sem massa, acoplada apenas via modelo elétrico. Entretanto, no protótipo experimental, a massa real do módulo fotovoltaico é considerada implicitamente na resposta estrutural global da asa.

Por fim, a Figura 8 apresenta de forma esquemática o fluxo metodológico da modelagem dinâmica adotada neste trabalho, evidenciando a sequência de etapas que compõem o modelo desenvolvido para análise da geração de potência elétrica em VANTs bioinspirados com asas batentes.

Figura 8 – Fluxograma do modelo computacional desenvolvido para análise da geração de potência elétrica em asas batentes com células solares.



Fonte: Próprio autor.

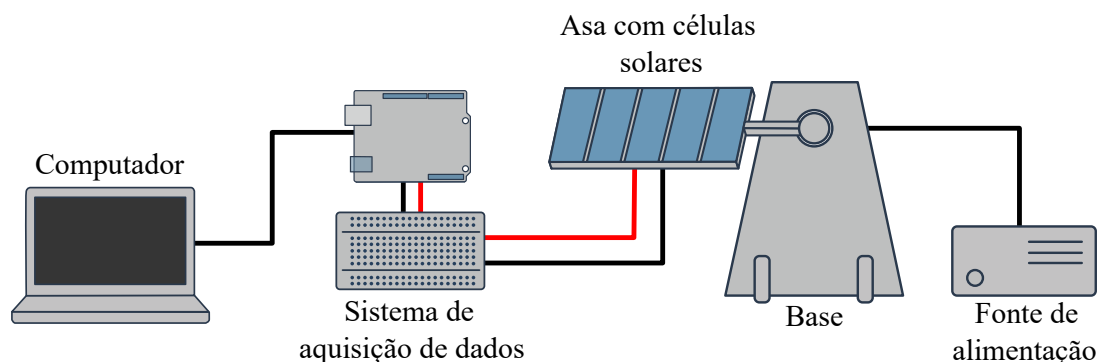
2.2 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Com o objetivo de validar experimentalmente os efeitos do movimento oscilatório na geração de potência elétrica por módulos fotovoltaicos embarcados, foi projetada e construída uma bancada experimental dedicada. A montagem foi concebida para reproduzir, em condições controladas, a cinemática simplificada de uma asa batente equipada com células solares, permitindo a comparação direta entre o desempenho energético em regimes estacionário e dinâmico.

A concepção da bancada experimental, representada na Figura 9, buscou assegurar modularidade, estabilidade mecânica e reprodutibilidade dos ensaios, além de possibilitar ajustes sistemáticos das condições de operação. O conjunto experimental é composto por três subsistemas principais:

1. Estrutura de sustentação e movimentação da asa com módulos fotovoltaicos;
2. Sistema de acionamento elétrico e controle da oscilação angular;
3. Sistema de aquisição e monitoramento dos sinais elétricos e ambientais.

Figura 9 – Esquema da bancada experimental desenvolvida.



Fonte: Próprio autor.

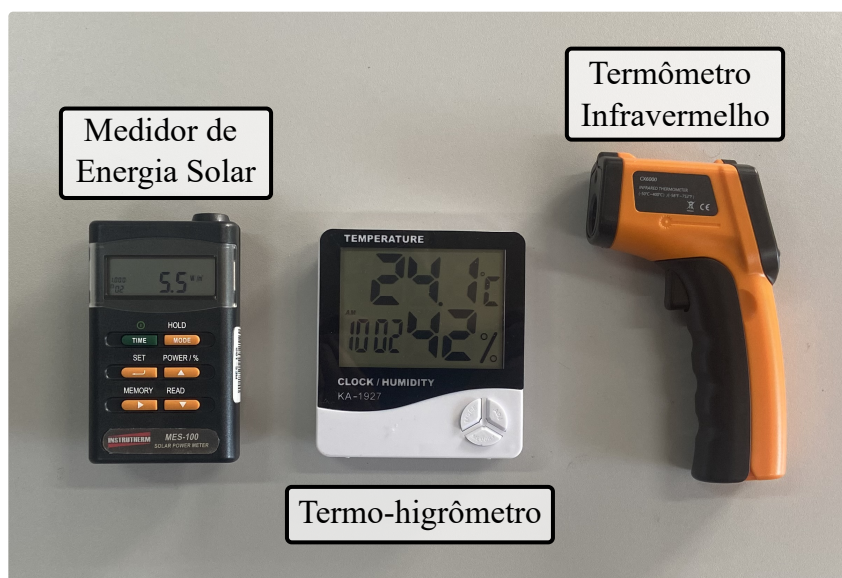
A asa experimental é representada por uma estrutura rígida leve, utilizada como suporte para módulos fotovoltaicos, os quais são fixados ao longo de sua extensão. Essa estrutura está acoplada a uma base rígida, responsável por garantir estabilidade durante a realização dos ensaios. A conexão entre a base e a asa é realizada por meio de uma junta articulada, que permite a rotação controlada em torno de um eixo, viabilizando a imposição de movimentos angulares periódicos.

O movimento oscilatório é gerado por um sistema de acionamento elétrico composto por um motor alimentado por uma fonte de corrente contínua estabilizada. O acoplamento mecânico entre o motor e a junta articulada permite a conversão do movimento rotacional do atuador em uma oscilação angular da asa, reproduzindo, de forma simplificada, o batimento considerado na modelagem computacional. Os cabos de alimentação e os condutores elétricos provenientes dos módulos fotovoltaicos são organizados de modo a minimizar interferências mecânicas e elétricas durante a operação.

O sistema de aquisição de dados é responsável pelo monitoramento contínuo das grandezas elétricas geradas pelos módulos fotovoltaicos, permitindo o registro temporal de tensão, corrente e potência elétrica. Os sinais medidos são transmitidos a um computador para armazenamento e posterior processamento, garantindo sincronização adequada com o movimento imposto à estrutura.

Além das grandezas elétricas, as condições ambientais durante os ensaios foram monitoradas de forma sistemática. A instrumentação utilizada, apresentada na Figura 10, incluiu um termo-higrômetro para medição da temperatura e umidade do ar, um termômetro infravermelho para a avaliação da temperatura superficial das células solares e um medidor portátil de energia solar para a quantificação da irradiância incidente. Esses dados foram registrados com o objetivo de caracterizar o ambiente de teste, assegurando a rastreabilidade experimental e permitindo análises comparativas consistentes entre diferentes ensaios.

Figura 10 – Instrumentação utilizada nos testes.



Fonte: Próprio autor.

A metodologia experimental foi estruturada de modo a permitir a realização de ensaios sob dois regimes operacionais distintos:

- **Regime estacionário:** a estrutura permanece fixa em uma orientação previamente ajustada em relação à incidência solar, servindo como condição de referência para a avaliação do desempenho fotovoltaico sem efeitos dinâmicos.
- **Regime dinâmico (oscilatório):** a estrutura é submetida a um movimento angular periódico, reproduzindo o batimento da asa considerado na modelagem numérica, com o objetivo de investigar as flutuações de potência elétrica associadas à variação temporal do ângulo de incidência solar.

Todos os ensaios foram conduzidos em ambiente externo, durante intervalos caracterizados por elevada disponibilidade de radiação solar, de modo a reduzir a influência de variações atmosféricas abruptas. A adoção de procedimentos padronizados para montagem, instrumentação e aquisição de dados permitiu garantir a comparabilidade entre os diferentes cenários avaliados.

2.2.1 Desenvolvimento e Construção do Protótipo do Sistema MPPT

Esta subseção descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento conceitual e a arquitetura funcional do protótipo do sistema de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT), projetado para aplicação em VANTs bioinspirados. O foco recai sobre os princípios de concepção do sistema e sobre as estratégias de integração eletroeletrônica, garantindo reprodutibilidade, escalabilidade e coerência com os objetivos energéticos da plataforma.

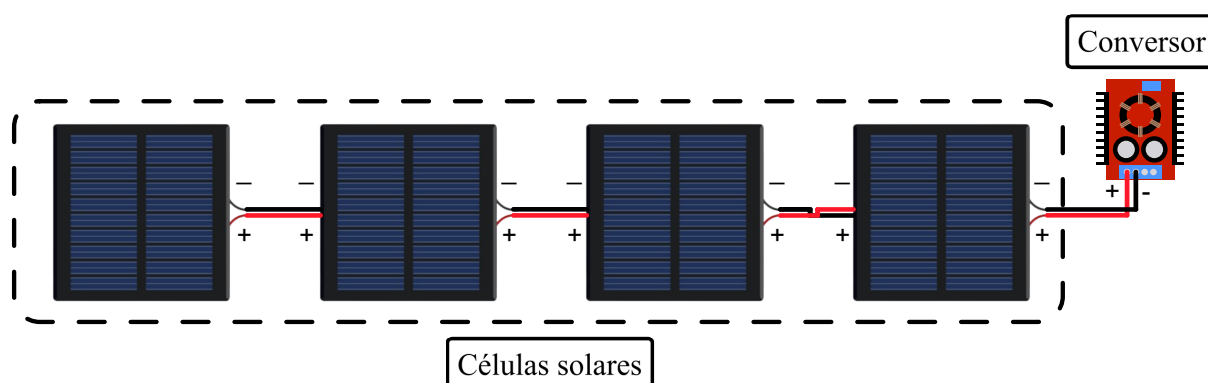
O sistema foi concebido como um subsistema embarcado responsável por maximizar a extração de potência dos módulos fotovoltaicos sob condições variáveis de irradiância, orientação

e carga elétrica, além de gerenciar a conversão e o armazenamento da energia gerada. A arquitetura adotada reflete um compromisso entre eficiência energética, simplicidade construtiva e compatibilidade com restrições típicas de VANTs de pequeno porte, tais como massa, volume e consumo auxiliar.

A metodologia de desenvolvimento baseou-se na decomposição funcional do sistema energético em três subsistemas principais: (i) geração fotovoltaica, (ii) conversão e gerenciamento de potência e (iii) armazenamento e consumo de energia. Essa divisão permitiu uma abordagem modular, facilitando tanto a implementação experimental quanto a futura adaptação do sistema para diferentes configurações de aeronaves ou estratégias de controle.

O subsistema de geração, representado pela Figura 11, é composto por módulos fotovoltaicos conectados de forma a atender aos níveis de tensão e corrente requeridos pelo sistema de conversão. A associação elétrica dos módulos foi definida com base em critérios funcionais, visando compatibilidade com o estágio de conversão CC-CC e com as condições típicas de operação em voo.

Figura 11 – Esquema do sistema de geração fotovoltaica.

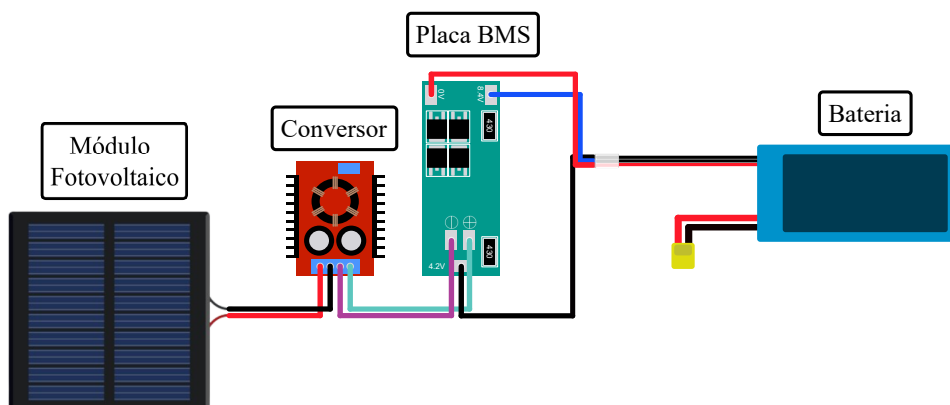


Fonte: Próprio autor.

A conversão e o gerenciamento da potência são realizados por meio de um conversor CC-CC operando sob a lógica de rastreamento do ponto de máxima potência. Esse estágio tem a função de adaptar dinamicamente a impedância vista pelos módulos fotovoltaicos, garantindo operação próxima ao ponto de máxima potência independentemente das variações impostas pelo ambiente ou pelo perfil de consumo. A implementação do MPPT foi concebida de modo a permitir sua integração com sistemas de controle embarcados, preservando a flexibilidade para diferentes algoritmos de rastreamento.

O subsistema de armazenamento, Figura 12, é responsável por acumular a energia convertida, assegurando continuidade no fornecimento elétrico e proteção contra condições operacionais adversas, como sobretensão ou descarga excessiva. A integração com o estágio de conversão foi realizada de forma a garantir segurança elétrica e compatibilidade com os regimes dinâmicos de geração característicos de asas batentes.

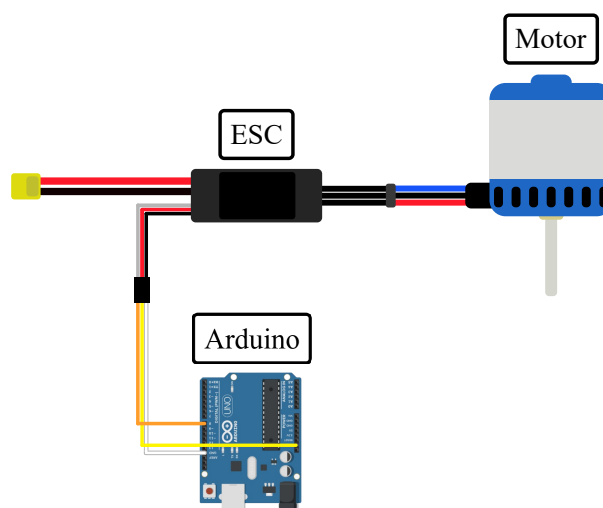
Figura 12 – Esquema do sistema de armazenamento e alimentação.



Fonte: Próprio autor.

Para representar uma condição realista de consumo energético, o sistema foi integrado a uma carga elétrica controlada, conforme Figura 13, capaz de simular demandas variáveis semelhantes às encontradas em voo. Essa abordagem permitiu avaliar o comportamento do MPPT sob diferentes níveis de solicitação de potência, sem comprometer a generalidade metodológica da análise.

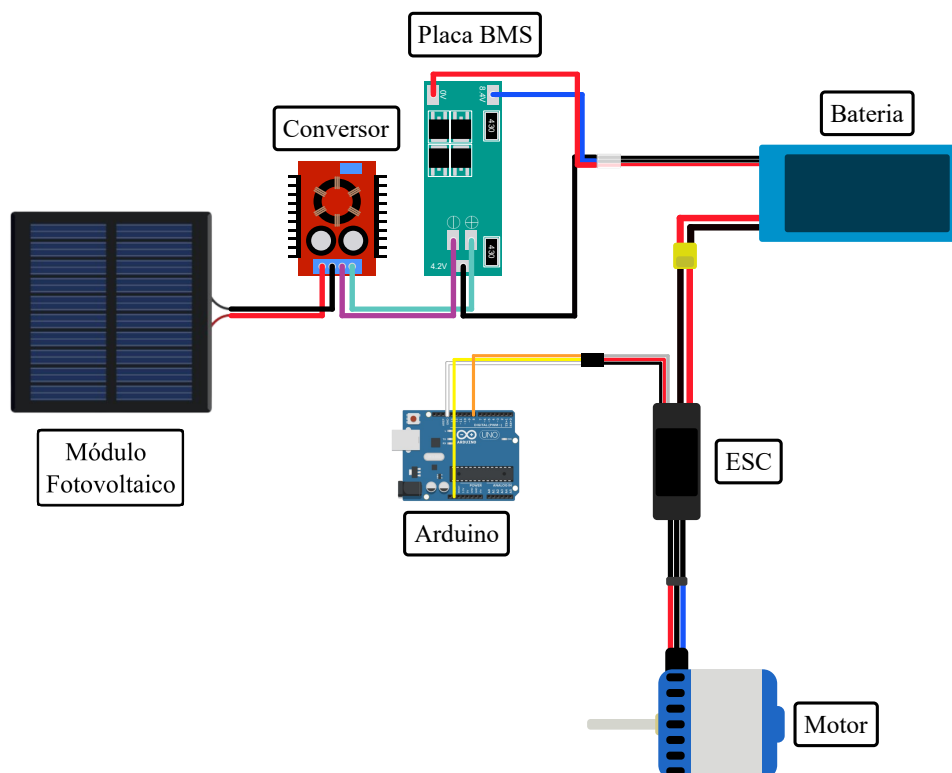
Figura 13 – Esquema do sistema motopropulsor.



Fonte: Próprio autor.

A integração eletroeletrônica dos subsistemas foi realizada de maneira modular, priorizando organização física, robustez das conexões e facilidade de instrumentação, representado pela Figura 14. Essa estratégia possibilitou a substituição ou reconfiguração de componentes individuais sem a necessidade de alterações estruturais significativas no sistema como um todo.

Figura 14 – Esquema completo do sistema MPPT.



Fonte: Próprio autor.

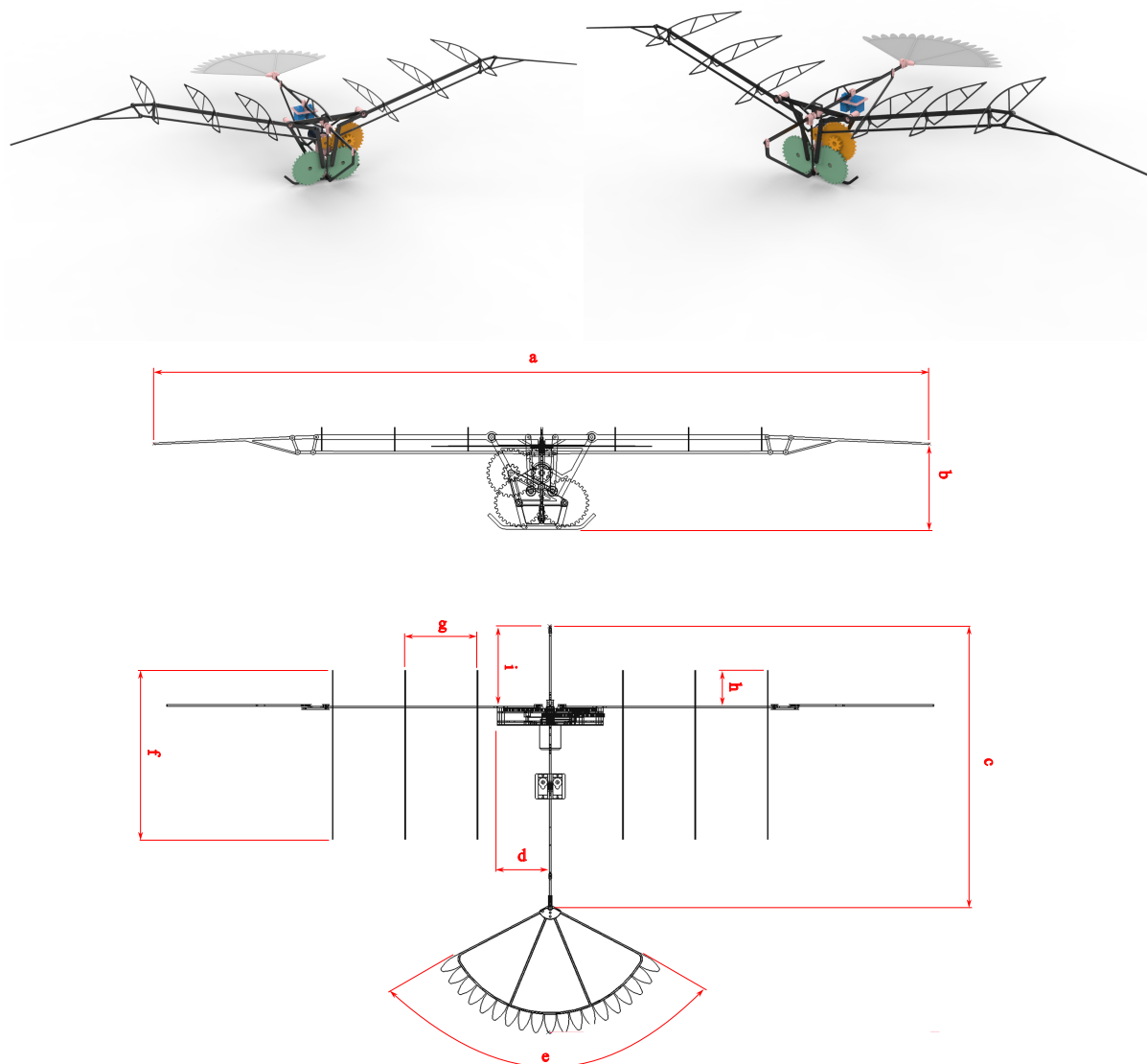
Por fim, o desenvolvimento metodológico do sistema MPPT foi conduzido de modo a separar claramente os aspectos conceituais e funcionais, tratados nesta seção, dos detalhes construtivos, especificações de componentes e registros visuais do protótipo físico.

2.2.2 Protótipo do VANT: CAD e Prototipagem Aditiva

O desenvolvimento do protótipo físico do VANT bioinspirado constituiu uma etapa essencial para assegurar a coerência entre a modelagem computacional, os ensaios experimentais e a validação em bancada. Essa fase permitiu a transição sistemática do domínio teórico-numérico para a materialização do sistema, viabilizando a avaliação de aspectos estruturais, funcionais e de integração eletromecânica em condições controladas.

Para garantir precisão geométrica, flexibilidade de projeto e reprodutibilidade construtiva, empregaram-se ferramentas de desenho assistido por computador (CAD, do inglês *Computer-Aided Design*), com destaque para a plataforma *FreeCAD*[®]. A escolha desse ambiente deve-se à sua natureza paramétrica, ampla documentação e compatibilidade direta com processos de prototipagem por manufatura aditiva. A Figura 15 apresenta o protótipo do VANT bioinspirado desenvolvido em ambiente CAD, evidenciando a configuração estrutural geral da aeronave e o arranjo do mecanismo responsável pelo movimento de batimento das asas.

Figura 15 – Protótipo do VANT bioinspirado desenvolvido em ambiente CAD, com indicação dos principais parâmetros geométricos: (a) 1006,62 mm; (b) 123,50 mm; (c) 366,30 mm; (d) 79,00 mm; (e) 231,51 mm; (f) 220,39 mm; (g) 94,00 mm; (h) 48,30 mm; (i) 105,00 mm.



Fonte: Próprio autor.

O desenvolvimento tridimensional foi conduzido de forma paramétrica, iniciando-se pela definição dos principais subconjuntos do VANT, incluindo corpo central, superfícies de asa, mecanismos de batimento, articulações móveis, sistemas de transmissão e compartimentos destinados à eletrônica embarcada. A modelagem paramétrica permitiu estabelecer relações geométricas entre componentes interdependentes, favorecendo um processo iterativo de ajuste e refinamento, fundamental para sistemas bioinspirados com múltiplos graus de liberdade.

Após a criação dos esboços bidimensionais, as geometrias foram extrudadas e organizadas

em conjuntos articulados. Procedimentos sistemáticos de verificação de interferência e análise de folgas foram realizados no ambiente CAD, assegurando compatibilidade entre partes móveis e evitando colisões durante o ciclo de batimento das asas. Essa etapa foi particularmente relevante para garantir a viabilidade cinemática do mecanismo sem comprometer a integridade estrutural.

A cinemática de batimento adotada baseou-se em mecanismos articulados clássicos capazes de converter movimento rotacional contínuo em oscilação angular alternada, configuração amplamente empregada em sistemas de asas batentes (baseado na Figura 3d). A escolha desse mecanismo se deve especialmente à sua relativa viabilidade construtiva e uma adequada capacidade de sincronização de batidas. A definição geométrica das articulações e dos elos foi conduzida de modo a assegurar sincronismo, repetibilidade do movimento e minimização de perdas mecânicas associadas a folgas excessivas ou desalinhamentos.

Os elementos de transmissão, como engrenagens e acoplamentos, foram projetados a partir de perfis normalizados disponíveis em bibliotecas CAD, respeitando critérios geométricos e funcionais usuais em sistemas mecânicos de precisão. Simulações virtuais de montagem e colisão permitiram antecipar ajustes necessários antes da fabricação física, reduzindo retrabalho e desperdício de material.

A materialização dos componentes foi realizada por meio de manufatura aditiva, utilizando tecnologia de deposição de material fundido (*Fused Deposition Modeling* FDM). Esse processo foi selecionado por permitir rápida prototipagem por impressão (Figura 16), baixo custo relativo e elevada flexibilidade geométrica, características adequadas ao desenvolvimento iterativo de protótipos funcionais. O fatiamento dos modelos e a definição dos parâmetros operacionais foram conduzidos em software dedicado, de forma compatível com as restrições geométricas e estruturais dos componentes.

Figura 16 – Equipamento de impressão 3D utilizado na prototipagem.



Fonte: Próprio autor.

2.2.2.1 Cinemática do Batimento de Asa

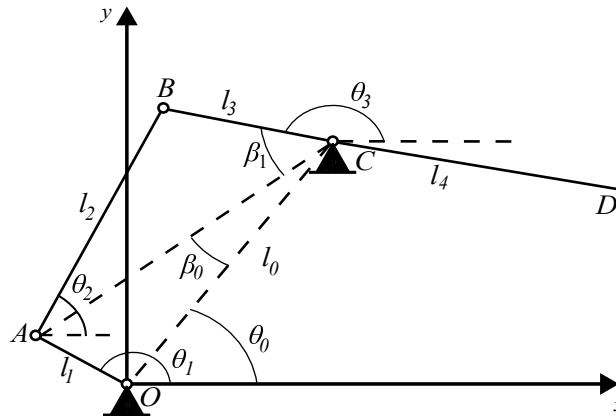
Para viabilizar a análise da cinemática das batidas de asa em VANTs bioinspirados, adotou-se um modelo de quatro barras baseado no mecanismo de manivela dupla com balancim duplo (Figura 3d), amplamente utilizado em sistemas biomiméticos por sua capacidade de replicar o movimento simétrico e oscilatório observado em aves. Em virtude da simetria em torno do plano longitudinal da aeronave, a modelagem matemática foi restrita a um único lado do mecanismo, sem perda de generalidade.

Ressalta-se que a dinâmica desse mecanismo não é considerada na formulação apresentada na seção 2.1 deste trabalho. Por outro lado, este estudo da cinemática é considerado importante e se mostra necessário para o projeto virtual em CAD, apresentado na seção 2.2.2

O sistema mecânico é composto por quatro barras articuladas conforme o diagrama vetorial da Figura 17, sendo descrito pelas variáveis geométricas e angulares:

- l_0 : distância fixa entre a estrutura base (O) e o ponto de articulação (C);
- l_1, l_2, l_3 : comprimentos das barras OA , AB e BC , respectivamente;
- l_4 : extensão adicional até o centro de massa da asa;
- $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$: ângulos de montagem e rotação instantânea das respectivas ligações.

Figura 17 – Vetor de deslocamento do mecanismo de batimento.



Fonte: Próprio autor.

Para o correto entendimento da posição instantânea do mecanismo ao longo do ciclo de batida, estabeleceu-se o diagrama vetorial correspondente em um sistema de coordenadas cartesianas fixo. A formulação vetorial do fechamento do circuito $OABC$ segue:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_0 + \vec{l}_3 \quad (29)$$

Que, ao ser expandida nas componentes cartesianas, resulta no sistema:

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 = l_0 \cos \theta_0 + l_3 \cos \theta_3 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 = l_0 \sin \theta_0 + l_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (30)$$

sendo $l_i = |\vec{l}_i|$, para $i = 0, \dots, 3$.

Estas equações garantem a condição de fechamento geométrico do mecanismo em qualquer instante da batida, desde que respeitadas as restrições de montagem. A resolução explícita de θ_2 e θ_3 é obtida a partir da combinação de relações trigonométricas auxiliares. Introduce-se a variável l_{AC} , representando a distância direta entre os pontos A e C , dada por:

$$l_{AC}^2 = l_0^2 + l_1^2 - 2l_0l_1 \cos(\theta_1 - \theta_0) \quad (31)$$

A partir de l_{AC} , determinam-se os ângulos auxiliares β_0 e β_1 :

$$\beta_0 = \arcsin \left(\frac{l_1}{l_{AC}} \sin(\theta_1 - \theta_0) \right) \quad (32)$$

$$\beta_1 = \arccos \left(\frac{l_{AC}^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_{AC}} \right) \quad (33)$$

Finalmente, o ângulo instantâneo θ_3 é obtido diretamente como:

$$\theta_3 = \pi - \beta_0 - \beta_1 + \theta_0 \quad (34)$$

O ângulo θ_2 , correspondente à ligação intermediária AB , é calculado pela expressão:

$$\theta_2 = \arcsin \left(\frac{l_0 \sin \theta_0 + l_3 \sin \theta_3 - l_1 \sin \theta_1}{l_2} \right) \quad (35)$$

O centroide da ligação AB é relevante para análises dinâmicas posteriores e é definido pelas coordenadas instantâneas (x_{c2}, y_{c2}) :

$$\begin{cases} x_{c2} = l_1 \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cos \theta_2 \\ y_{c2} = l_1 \sin \theta_1 + \frac{l_2}{2} \sin \theta_2 \end{cases} \quad (36)$$

A análise da velocidade angular das ligações é conduzida pela diferenciação temporal da equação posicional. Aplicando a derivada temporal às Equações 30, obtêm-se as equações diferenciais associadas às velocidades angulares:

$$\begin{cases} -l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - l_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 = -l_3 \sin \theta_3 \dot{\theta}_3 \\ l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + l_2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 = l_3 \cos \theta_3 \dot{\theta}_3 \end{cases} \quad (37)$$

Estas expressões podem ser organizadas em forma matricial, facilitando a resolução simul-

tânea dos valores de $\dot{\theta}_2$ e $\dot{\theta}_3$ em função da velocidade angular da manivela $\dot{\theta}_1$:

$$\begin{bmatrix} -l_2 \sin \theta_2 & l_3 \sin \theta_3 \\ l_2 \cos \theta_2 & -l_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 \\ l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

De forma explícita, as velocidades angulares são obtidas por:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_2 = \frac{l_1 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{l_2 \sin(\theta_2 - \theta_3)} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_3 = \frac{l_1 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{l_3 \sin(\theta_2 + \pi - \theta_3)} \dot{\theta}_1 \end{cases} \quad (39)$$

As componentes da velocidade linear do centroide AB são, por consequência, expressas como:

$$\begin{cases} \dot{x}_{c2} = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - \frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ \dot{y}_{c2} = l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \end{cases} \quad (40)$$

A análise da aceleração angular é indispensável para a caracterização dinâmica do mecanismo de batimento, sobretudo considerando que o movimento oscilatório não se restringe a condições estáticas. A presença de acelerações instantâneas implica em esforços dinâmicos relevantes, que influenciam tanto a integridade estrutural do mecanismo quanto a eficiência energética do sistema fotovoltaico acoplado.

A formulação da aceleração é derivada da diferenciação temporal da equação vetorial de posição, conduzindo às expressões em função das segundas derivadas dos ângulos. Partindo das equações componentes de posição descritas na Equação 30, realiza-se a diferenciação temporal completa, resultando em:

$$\begin{bmatrix} -l_2 \sin \theta_2 & l_3 \sin \theta_3 \\ l_2 \cos \theta_2 & -l_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_1 \cos \theta_1 & -l_2 \cos \theta_2 & l_3 \cos \theta_3 \\ -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_2 & l_3 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 \ddot{\theta}_1 \\ -l_1 \cos \theta_1 \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (41)$$

A Equação 41 expressa, de forma matricial, a relação entre os termos de aceleração angular e os efeitos centrífugos associados às velocidades angulares obtidas. Essa formulação permite, mediante técnicas de resolução matricial ou via métodos numéricos diretos, a obtenção precisa de $\ddot{\theta}_2$ e $\ddot{\theta}_3$ para cada instante do ciclo de batida.

De maneira explícita, as expressões para acelerações angulares podem ser reorganizadas em função das variáveis conhecidas, resultando em:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_2 = \frac{-l_1 \cos(\theta_1 - \theta_3) \dot{\theta}_1^2 - l_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_2^2 + l_3 \dot{\theta}_3^2 - l_1 \sin(\theta_1 - \theta_3) \ddot{\theta}_1}{l_2 \sin(\theta_2 - \theta_3)} \\ \ddot{\theta}_3 = \frac{-l_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1^2 + l_3 \cos(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_3^2 - l_2 \dot{\theta}_2^2 + l_1 \sin(\theta_2 - \theta_1) \ddot{\theta}_1}{l_2 \sin(\theta_2 - \theta_3)} \end{cases} \quad (42)$$

Além das acelerações angulares, é relevante considerar a aceleração do centro de massa da ligação intermediária AB , especialmente para análises posteriores de esforços mecânicos e integração com sensores embarcados. Diferenciando-se a equação de velocidade linear do centroide, 40, obtêm-se as componentes da aceleração linear instantânea:

$$\begin{cases} \ddot{x}_{c2} = -l_1 \ddot{\theta}_1 \sin \theta_1 - l_1 \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 - \frac{l_2}{2} \ddot{\theta}_2 \sin \theta_2 - \frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 \\ \ddot{y}_{c2} = l_1 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_1 - l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 + \frac{l_2}{2} \ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - \frac{l_2}{2} \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (43)$$

Estas expressões permitem quantificar a variação instantânea da aceleração linear ao longo do ciclo de movimento, aspecto essencial tanto para o dimensionamento estrutural quanto para avaliações sobre a estabilidade operacional do VANT.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados resultados teóricos computacionais e experimentais. Tem-se na parte teórica a simulação da dinâmica de uma viga flexível, ilustrando a estrutura equivalente de uma asa. Por outro lado, para os resultados experimentais se tem especialmente a análise da potência elétrica gerada por células solares posicionadas em uma estrutura oscilante, na forma de batidas com combinações de duas diferentes frequências e amplitudes angulares. Para ambos os casos o movimento foi imposto em uma das extremidades da estrutura.

3.1 RESULTADOS TEÓRICOS

Para demonstrar a metodologia considerada neste trabalho se tem a modelagem computacional integrada que combina a dinâmica estrutural de uma asa batente, modelada como uma viga de Euler-Bernoulli, com um modelo elétrico detalhado de célula fotovoltaica e um modelo vetorial de incidência solar. O objetivo central desta etapa é compreender, de forma quantitativa e física, como o movimento de batimento das asas influencia a irradiância efetiva incidente sobre os módulos solares, o deslocamento do ponto de operação elétrico ao longo das curvas características da célula e, conseqüentemente, a potência elétrica gerada.

Diferentemente de abordagens puramente estáticas, a presente análise considera explicitamente a natureza não estacionária do problema, em que variações angulares periódicas induzem flutuações contínuas no acoplamento geométrico entre a superfície fotovoltaica e o vetor solar. Tal abordagem é particularmente relevante para VANTs bioinspirados, nos quais o batimento das asas é parte intrínseca do regime de voo (Holness *et al.*, 2019; Shyy *et al.*, 2013; Chin; Lentink, 2016).

Antes da análise dinâmica acoplada, faz-se necessário compreender o comportamento elétrico fundamental da célula fotovoltaica isoladamente. Para isso, foram geradas curvas características de corrente versus tensão ($I-V$) e potência versus tensão ($P-V$) a partir do modelo elétrico adotado, considerando variações sistemáticas de irradiância e temperatura.

As curvas $I-V$ representam a resposta elétrica intrínseca da célula, evidenciando parâmetros fundamentais como a corrente de curto-circuito (I_{sc}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}). Por outro lado, as curvas $P-V$ permitem identificar diretamente a potência máxima extraível e sua sensibilidade às condições ambientais. A coerência dessas curvas com modelos consagrados na literatura constitui uma etapa essencial de validação do modelo fotovoltaico empregado (Soto; Klein; Beckman, 2006; Villalva; Gazoli; Filho, 2009; Skoplaki; Palyvos, 2009).

Os parâmetros utilizados para a geração das curvas características $I-V$ e $P-V$ são apresentados na Tabela 2. Esses valores correspondem aos parâmetros elétricos do modelo equivalente da célula fotovoltaica adotado neste trabalho. A definição desses parâmetros é fundamental para

garantir a coerência das curvas simuladas com o comportamento físico esperado para dispositivos fotovoltaicos sob diferentes condições de irradiância e temperatura.

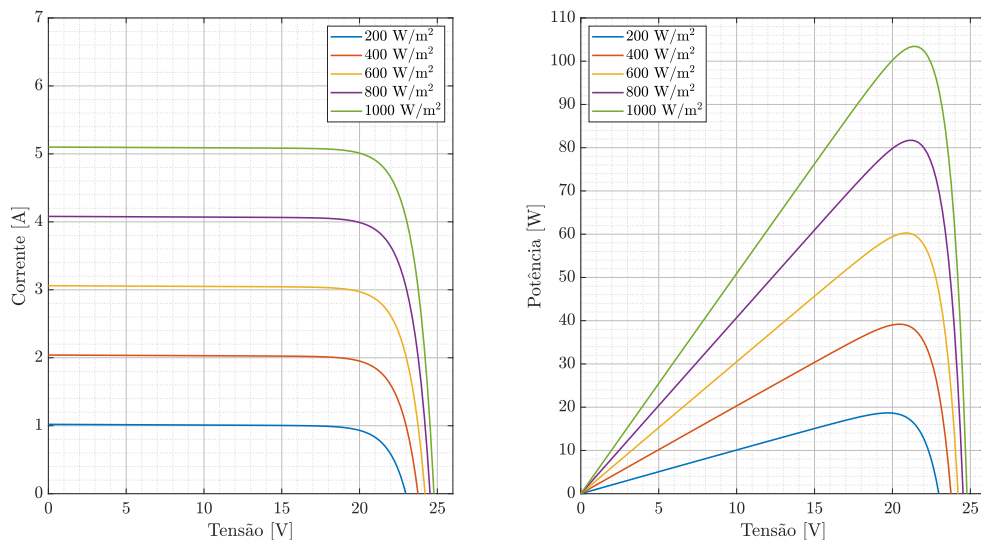
Tabela 2 – Parâmetros utilizados no modelo elétrico da célula fotovoltaica para geração das curvas $I-V$ e $P-V$.

Parâmetro	Valor	Unidade
Constante de Boltzmann (k)	$1,38 \times 10^{-23}$	J/K
Carga do elétron (q)	$1,60 \times 10^{-19}$	C
Energia de <i>bandgap</i> (E_g)	1,12	eV
Fator de idealidade do diodo (n)	1,20	-
Corrente de saturação (I_0)	1×10^{-9}	A
Resistência em série (R_s)	4×10^{-3}	Ω
Resistência <i>shunt</i> (R_{sh})	1000	Ω
Corrente de curto circuito (I_{sc})	5	A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	24	V
Irradiância de referência (G_{ref})	1000	W/m ²
Temperatura de referência (T_{ref})	25	°C
Coefficiente de temperatura (K_i)	$1,70 \times 10^{-3}$	A/°C

Fonte: Próprio autor.

A Figura 18 apresenta as curvas corrente-tensão ($I-V$) e potência-tensão ($P-V$) da célula fotovoltaica para diferentes níveis de irradiância incidente.

Figura 18 – Curvas $I-V$ e $P-V$ da célula solar: efeito da irradiância.



Fonte: Próprio autor.

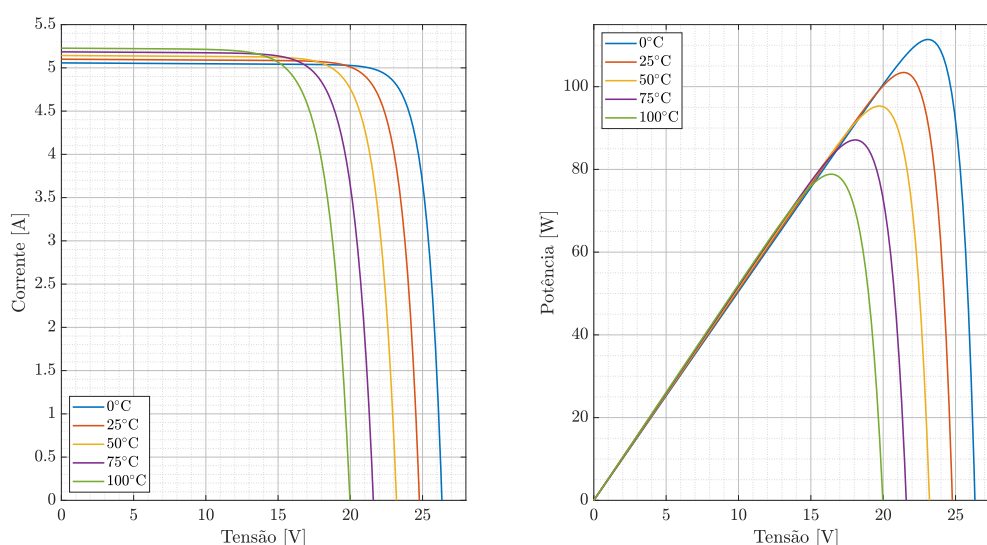
Observa-se que o aumento da irradiância resulta em um crescimento praticamente linear da corrente de curto-circuito, enquanto a tensão de circuito aberto sofre variações relativamente modestas. Esse comportamento é característico de dispositivos fotovoltaicos de junção P-N e

decorre do aumento da corrente fotogerada, proporcional ao fluxo de fótons incidentes (Villalva; Gazoli; Filho, 2009; Soto; Klein; Beckman, 2006).

Do ponto de vista energético, o efeito mais relevante manifesta-se na curva $P-V$, na qual o ponto de máxima potência (MPP) desloca-se para valores crescentes de potência à medida que a irradiância aumenta. Nota-se que a posição do MPP em termos de tensão permanece relativamente estável, enquanto a potência máxima cresce de forma aproximadamente proporcional à irradiância. Tal característica é particularmente relevante para aplicações em VANTs solares, pois indica que variações rápidas de irradiância, como aquelas induzidas pelo batimento das asas, impactam primariamente a potência disponível, sem alterar de forma significativa o nível ótimo de tensão de operação.

Esses resultados reforçam a hipótese de que a flutuação da irradiância efetiva causada pela variação angular da superfície fotovoltaica se traduz diretamente em oscilações de potência elétrica, exigindo estratégias de MPPT capazes de responder rapidamente a variações de amplitude relativamente elevada e frequência compatível com o regime de batimento. A Figura 19 ilustra o efeito da temperatura sobre as curvas $I-V$ e $P-V$.

Figura 19 – Curvas $I-V$ e $P-V$ da célula solar: efeito da temperatura.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que o aumento da temperatura provoca uma redução progressiva da tensão de circuito aberto, enquanto a corrente de curto-circuito apresenta apenas variações marginais. Esse comportamento é consequência direta do aumento da corrente de saturação reversa do diodo com a temperatura, o que reduz a tensão disponível na junção (Skoplaki; Palyvos, 2009; Duffie; Beckman, 2013).

A redução da tensão elétrica reflete-se de maneira clara na curva $P-V$, resultando em uma diminuição sistemática da potência máxima extraível da célula à medida que a temperatura se eleva. Além da redução do valor máximo de potência, observa-se também o deslocamento do

ponto de máxima potência para níveis mais baixos de tensão, fenômeno que possui implicações diretas no projeto de conversores MPPT.

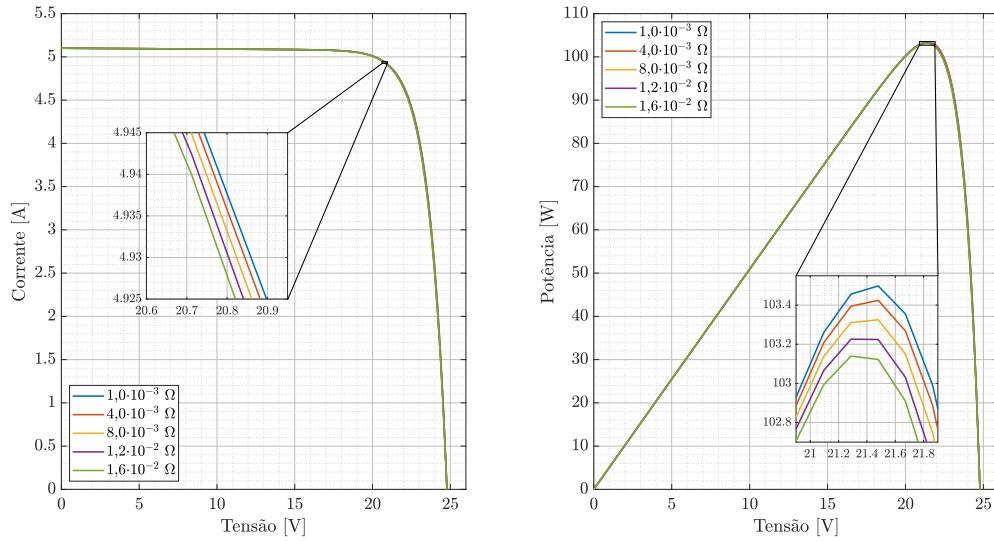
Nesse ínterim, esse efeito térmico assume importância adicional, uma vez que a temperatura da célula pode variar tanto em função da irradiância quanto do regime aerodinâmico local, incluindo efeitos convectivos associados ao movimento oscilatório da asa. Assim, os resultados obtidos indicam que a modelagem térmica não pode ser dissociada da análise elétrica em estudos de desempenho energético dinâmico, especialmente em missões de longa duração ou sob alta irradiância.

Além das variáveis ambientais (irradiância e temperatura), o desempenho elétrico de um módulo fotovoltaico é fortemente condicionado por parâmetros internos associados a perdas ôhmicas e mecanismos de recombinação, tipicamente representados, no modelo de um diodo, pelas resistências R_s e R_{sh} e pela corrente de saturação reversa I_0 . Em aplicações embarcadas e dinâmicas, como asas batentes, esses parâmetros tornam-se particularmente relevantes, pois determinam não apenas a potência máxima extraível em regime estacionário, mas também a sensibilidade do sistema a variações rápidas de condição de operação ao longo do ciclo de batimento.

Do ponto de vista físico, a resistência em série (R_s) agrega perdas por condução em contatos metálicos, trilhas e regiões semicondutoras, reduzindo o fator de forma (*fill factor*) e limitando a potência máxima, sobretudo em níveis elevados de corrente (condições de alta irradiância). Em contraste, a resistência de derivação (R_{sh}) está associada a caminhos alternativos de corrente e defeitos no material, degradando o desempenho principalmente em baixas irradiâncias, quando correntes parasitas podem se tornar comparáveis à corrente fotogerada. Por fim, a corrente de saturação I_0 governa a recombinação na junção e apresenta forte dependência térmica, sendo um dos principais responsáveis pela redução de V_{oc} e pela penalização da potência em temperaturas elevadas (Soto; Klein; Beckman, 2006; Villalva; Gazoli; Filho, 2009; Skoplaki; Palyvos, 2009).

A Figura 20 apresenta o impacto da resistência em série (R_s) sobre o comportamento elétrico da célula fotovoltaica.

Figura 20 – Curvas $I-V$ e $P-V$ da célula solar: efeito de R_s .



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que variações em R_s afetam principalmente a região de altas tensões da curva $I-V$, promovendo uma redução gradual da inclinação próxima ao ponto de máxima potência. Esse efeito está associado às perdas ôhmicas internas do dispositivo, que se tornam mais significativas à medida que a corrente circulante aumenta (Villalva; Gazoli; Filho, 2009).

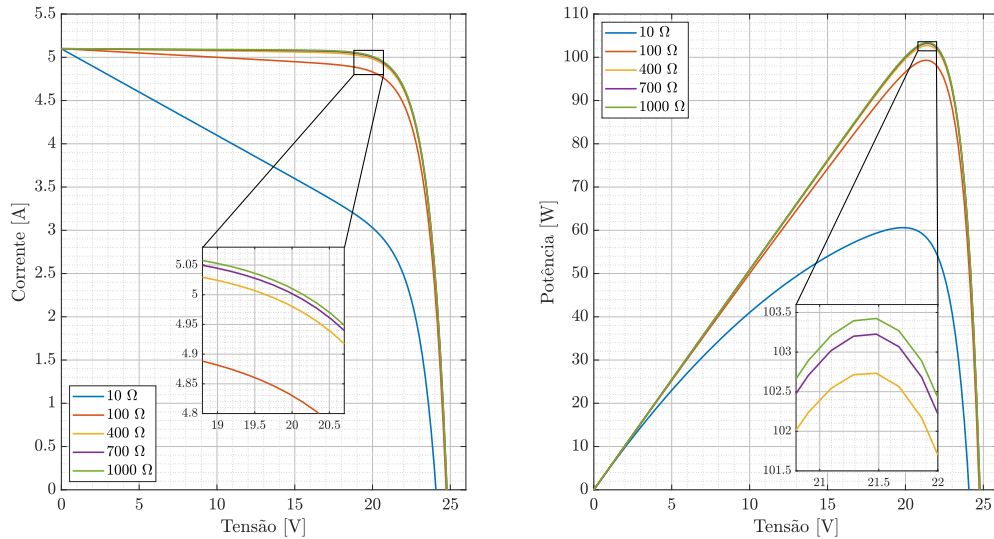
Na curva $P-V$, o aumento da resistência série resulta em uma redução da potência máxima extraível, bem como em um leve deslocamento do MPP. Embora as diferenças aparentes possam parecer pequenas em termos absolutos, o detalhamento apresentado nas ampliações evidencia que mesmo variações modestas de R_s são suficientes para impactar o rendimento energético global.

Em aplicações como a estudada, esse efeito adquire relevância prática, pois deformações estruturais, microfissuras e variações de contato elétrico induzidas pelo batimento das asas podem efetivamente alterar a resistência em série equivalente do sistema. Assim, os resultados indicam que a integridade elétrica e mecânica dos módulos fotovoltaicos deve ser considerada de forma integrada na avaliação do desempenho dinâmico.

A Figura 21 ilustra o efeito da resistência de *shunt* (R_{sh}) sobre as características elétricas da célula fotovoltaica. Observa-se que valores baixos de R_{sh} provocam uma degradação significativa da curva $I-V$, indicando o aumento das correntes de fuga internas. Do ponto de vista energético, a redução de R_{sh} resulta em perdas substanciais de potência, conforme evidenciado pela diminuição do pico da curva $P-V$. À medida que R_{sh} aumenta, as curvas convergem para um comportamento ideal, com recuperação da potência máxima e maior estabilidade do ponto de operação (Soto; Klein; Beckman, 2006; Skoplaki; Palyvos, 2009). Esses resultados são particularmente relevantes para sistemas fotovoltaicos integrados a asas batentes, nos quais defeitos de fabricação, delaminações ou danos induzidos por fadiga mecânica podem reduzir

a resistência de *shunt* ao longo do tempo. Assim, a análise evidencia que a confiabilidade elétrica dos módulos é um fator crítico para a manutenção do desempenho energético em regimes dinâmicos prolongados.

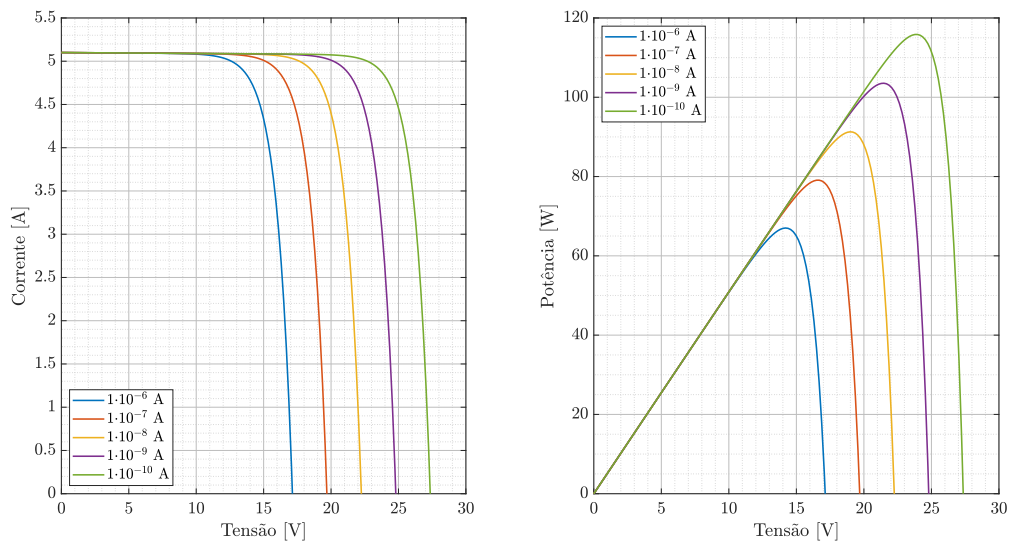
Figura 21 – Curvas $I-V$ e $P-V$ da célula solar: efeito de R_{sh} .



Fonte: Próprio autor.

A Figura 22 apresenta o efeito da corrente de saturação do diodo (I_0) sobre as curvas $I-V$ e $P-V$ da célula fotovoltaica.

Figura 22 – Curvas $I-V$ e $P-V$ da célula solar: efeito de I_0 .



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que o aumento de I_0 provoca uma redução acentuada da tensão de circuito aberto, consequência direta do aumento das correntes de recombinação internas na junção P-N,

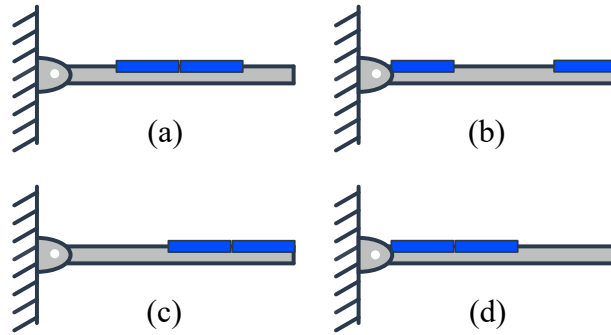
conforme destacam Soto, Klein e Beckman (2006). Na curva $P - V$, esse efeito manifesta-se por meio da redução progressiva da potência máxima e do deslocamento do MPP para níveis de tensão mais baixos. Diferentemente da irradiância, cuja influência é predominantemente escalar sobre a potência, a variação de I_0 altera de forma estrutural o formato das curvas, indicando degradação intrínseca do dispositivo. Nesse contexto, variações efetivas de I_0 podem estar associadas ao envelhecimento térmico, à radiação ultravioleta e a tensões mecânicas cíclicas impostas pelo batimento das asas. Dessa forma, os resultados reforçam a importância de considerar mecanismos de degradação interna na modelagem de longo prazo do desempenho fotovoltaico em plataformas aéreas flexíveis.

A resposta dinâmica estrutural da asa foi obtida a partir da integração temporal das equações de movimento do modelo de viga de Euler-Bernoulli, considerando excitação angular prescrita na raiz. Foram considerados 20 elementos para representar a viga com 100 cm de comprimento, além de largura de 2 cm e espessura de 5 mm, com módulo de elasticidade 210 GPa e densidade 7800 kg/m^3 .

A partir da solução do problema de autovalor associado às matrizes de massa e rigidez do sistema estrutural, obtêm-se as frequências naturais da viga considerada no modelo. Para a configuração adotada neste trabalho, as três primeiras frequências naturais são $f_1 = 4,2 \text{ Hz}$, $f_2 = 26,3 \text{ Hz}$ e $f_3 = 73,5 \text{ Hz}$, calculadas para o sistema não excitado, isto é, na ausência da imposição do movimento de batimento de asa, portanto, tem-se que a frequência fundamental da estrutura é superior à frequência de excitação associada ao batimento das asas, caracterizando um regime de excitação em baixa frequência. Essa condição implica que a resposta estrutural é predominantemente governada pela cinemática imposta, com efeitos desprezíveis em termos de dinâmica de ressonância, sendo portanto uma configuração desejável para evitar amplificação excessiva de tensões e deformações, conforme destacam Meirovitch (2001), Geradin e Rixen (2014).

A Figura 23 apresenta o esquema conceitual das configurações de posicionamento dos módulos fotovoltaicos ao longo comprimento da estrutura adotada nas análises computacionais. Cada configuração representa uma distinta distribuição espacial das células solares ao longo do comprimento total, mantendo-se constantes as propriedades geométricas, mecânicas e elétricas do sistema. As configurações incluem o posicionamento na região central, a concentração dos módulos próximos à raiz e a distribuição ao longo das extremidades, permitindo avaliar de forma sistemática a influência do acoplamento entre a resposta dinâmica estrutural e a geração instantânea de potência elétrica durante o regime de batimento de asas. As respectivas posições do par de células, para cada uma das quatro configurações, são tais que o início da célula coincide com um nós da malha estrutural, sendo: configuração 1, nós 5-8 e 13-16; configuração 2, nós 3-6 e 15-18; configuração 3, nós 13-16 e 17-20; configuração 4, nós 1-4 e 5-8, tendo cada célula um comprimento de 20 cm.

Figura 23 – Esquema das configurações de posicionamento das células solares ao longo da viga.

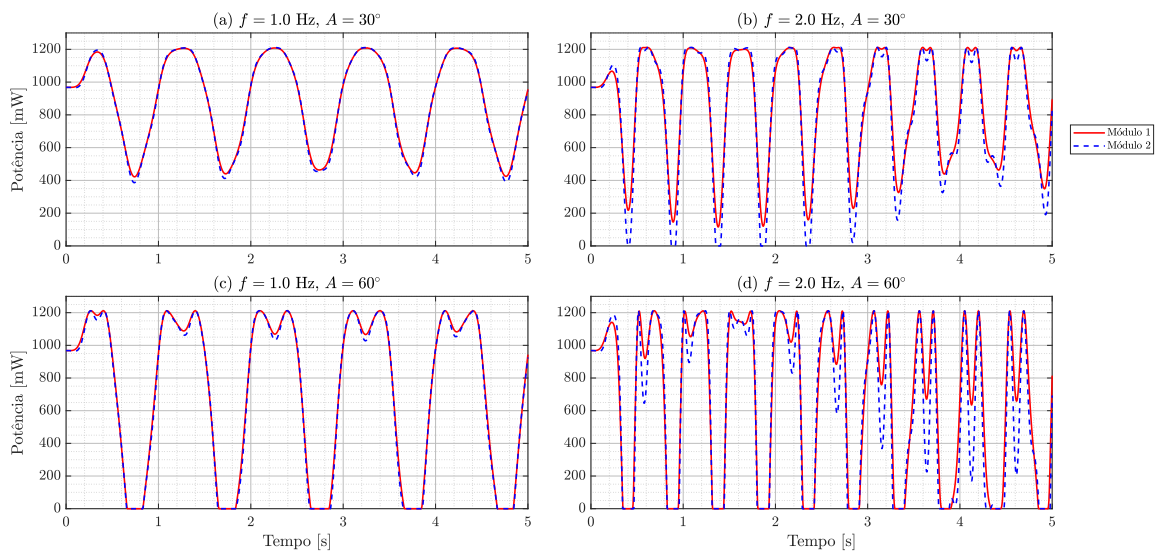


Fonte: Próprio autor.

A irradiância efetiva incidente sobre cada bloco de módulos fotovoltaicos foi calculada a partir do modelo vetorial de incidência solar, considerando a orientação instantânea da superfície da asa, a pose global da aeronave e a posição do sol. Essa abordagem permite capturar a natureza altamente não estacionária da captação solar em plataformas oscilatórias. Assim, a potência elétrica instantânea foi, portanto, calculada a partir da irradiância efetiva e das curvas características da célula solar, permitindo determinar o deslocamento dinâmico do ponto de operação ao longo do ciclo de batimento.

A Figura 24 apresenta a evolução temporal da potência elétrica gerada pelos dois módulos fotovoltaicos para a primeira combinação de posicionamento ao longo da asa (Figura 23a), considerando diferentes frequências de batimento ($f = 1$ e 2 Hz) e amplitudes angulares ($A = 30^\circ$ e 60°).

Figura 24 – Influência da frequência e da amplitude de batimento na potência elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos (configuração 1).



Fonte: Próprio autor.

Para a condição de baixa frequência e pequena amplitude (Figura 24a), observa-se uma oscilação aproximadamente periódica da potência em torno de um valor médio elevado. A potência não apresenta quedas abruptas, indicando que o vetor normal das superfícies permanece majoritariamente orientado de forma favorável ao vetor solar durante todo o ciclo. Os dois módulos exibem comportamento praticamente coincidente, sugerindo que a diferença geométrica entre as superfícies tem pouca influência quando a variação angular é moderada. Nesse regime, o termo de projeção associado ao produto escalar entre o vetor solar e o vetor normal varia suavemente, resultando em uma resposta energética quase harmônica (Holness *et al.*, 2019).

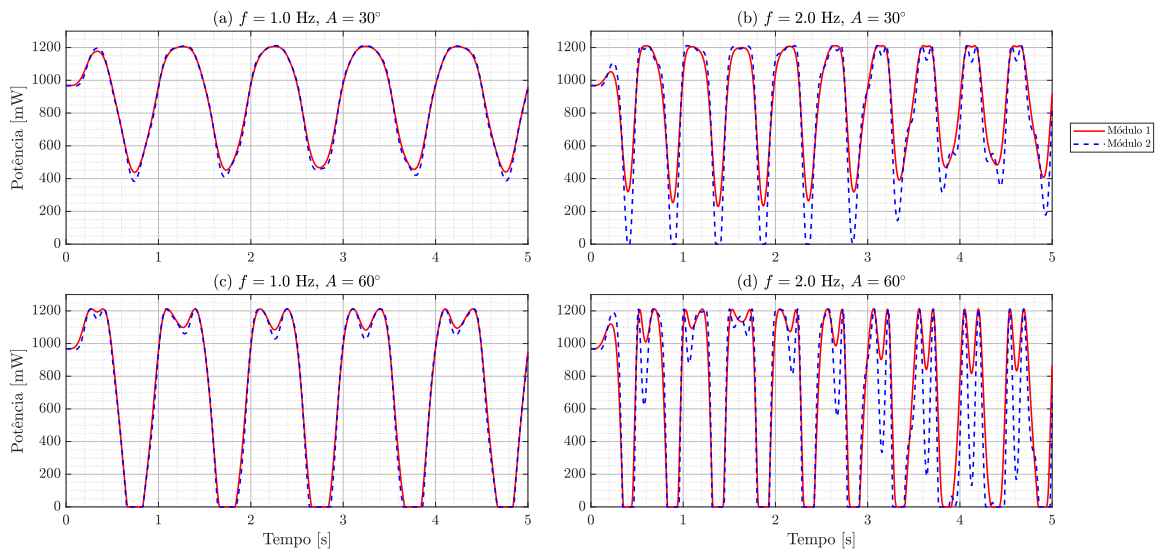
Com o aumento da frequência para $f = 2$ Hz mantendo $A = 30^\circ$ (Figura 24b), a potência passa a apresentar vales profundos e repetitivos dentro de cada ciclo. Esses vales correspondem a instantes em que a superfície efetivamente perde incidência solar direta devido à rápida variação angular, reduzindo drasticamente a irradiância projetada. Diferentemente do caso anterior, surgem diferenças perceptíveis entre os módulos, principalmente nos mínimos de potência, indicando maior sensibilidade à posição relativa e ao atraso de fase cinemático. O aumento da velocidade angular intensifica a taxa de variação do ângulo de incidência, produzindo regiões temporárias de orientação desfavorável ao fluxo solar (Shyy *et al.*, 2013).

Quando a amplitude é elevada para $A = 60^\circ$ (Figura 24c), mesmo em baixa frequência, a potência deixa de apresentar comportamento puramente senoidal. Observam-se patamares próximos de zero e múltiplos picos dentro de um mesmo período de batimento. Isso indica que, durante parte significativa do ciclo, o produto escalar entre o vetor normal e o vetor solar torna-se negativo ou próximo de nulo, caracterizando perda quase completa de geração. O sistema passa então a operar em regime geometricamente limitado, no qual apenas frações específicas do movimento contribuem para geração efetiva.

Esse efeito se torna ainda mais pronunciado para $f = 2$ Hz e $A = 60^\circ$ (Figura 24d), onde a potência apresenta sequências intermitentes de geração separadas por intervalos praticamente sem produção energética. Pequenas diferenças geométricas entre os módulos se tornam amplificadas, resultando em discrepâncias mais evidentes nos mínimos de potência. Esse comportamento é característico de regimes de grande excursão angular, nos quais perdas energéticas passam a ser dominadas pela orientação aerodinâmica instantânea e não apenas pela média temporal do movimento (Mueller; DeLaurier, 2003).

A Figura 25 ilustra a potência elétrica gerada ao longo do tempo para a segunda combinação de posicionamento dos módulos fotovoltaicos, caracterizada por uma distribuição mais deslocada em direção às extremidades da asa (Figura 23b). Em condições de baixa frequência e pequena amplitude (Figura 25a), o comportamento mantém caráter periódico e predominantemente suave, semelhante ao observado na Figura 24a. No entanto, nota-se uma leve amplificação das flutuações de potência, associada ao aumento da amplitude angular local experimentada pelos segmentos mais afastados da raiz da asa (Lentink *et al.*, 2007). Mesmo assim, a orientação média da superfície permanece favorável durante a maior parte do ciclo, resultando em elevada geração média e boa concordância entre os módulos.

Figura 25 – Influência da frequência e da amplitude de batimento na potência elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos (configuração 2).



Fonte: Próprio autor.

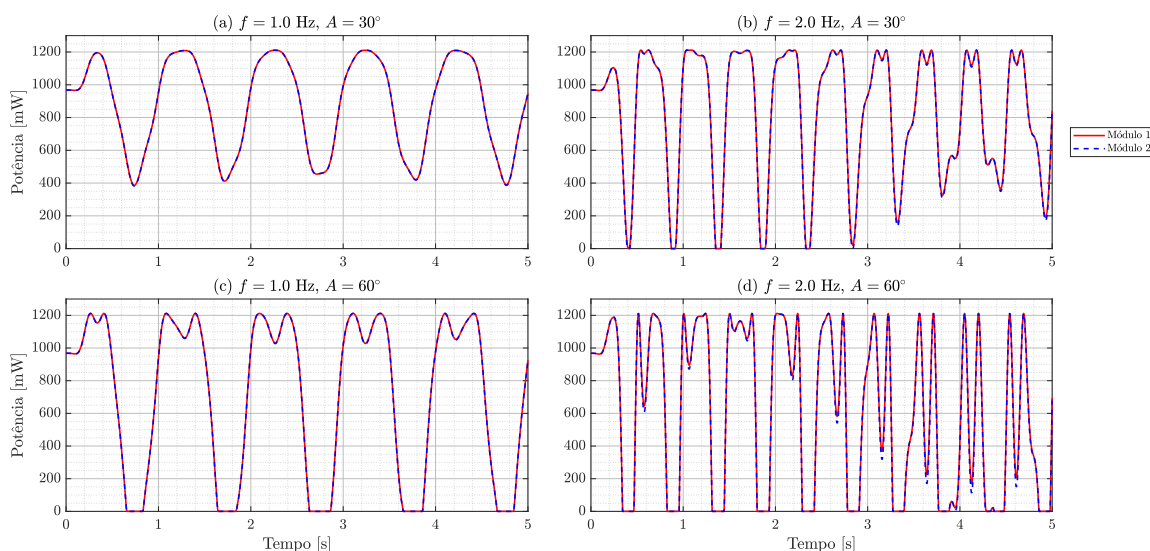
Para $f = 2 \text{ Hz}$ e $A = 30^\circ$ (Figura 25b), surgem quedas abruptas e repetitivas de potência, significativamente mais profundas no Módulo 2. Observa-se que, ao contrário do regime anterior, o sinal passa a apresentar regiões de quase anulação energética. Isso ocorre porque, nas posições mais afastadas da raiz, pequenas variações angulares geram grandes mudanças no ângulo de incidência solar, levando frequentemente a orientações desfavoráveis da superfície. O aumento da frequência intensifica esse efeito ao ampliar a velocidade angular instantânea (Shyy *et al.*, 2013). Com o aumento da amplitude para $A = 60^\circ$ (Figura 25c), aparecem intervalos com potência próxima de zero intercalados por picos estreitos de geração. Isso indica que apenas uma fração do ciclo de batimento contribui efetivamente para a produção energética, enquanto o restante ocorre com incidência solar praticamente nula.

Finalmente, para $f = 2 \text{ Hz}$ e $A = 60^\circ$ (Figura 25d), estabelece-se um regime intermitente. A potência passa a ocorrer em pulsos curtos separados por intervalos sem geração, com diferenças marcantes entre os módulos, particularmente no Módulo 2, que apresenta mínimos mais profundos e maior irregularidade temporal. Esse comportamento evidencia que, em regimes cinemáticos agressivos, a geração passa a ser governada predominantemente pela orientação instantânea local da superfície, tornando energeticamente menos eficiente a instalação de módulos nas regiões mais externas da asa (Mueller; DeLaurier, 2003).

A Figura 26 apresenta os resultados obtidos para a terceira combinação de posicionamento, na qual ambos os módulos encontram-se predominantemente em regiões mais distais da asa (Figura 23c). Mesmo no regime de menor amplitude e frequência (Figura 26a), observa-se que a geração mantém caráter periódico, porém com alguns vales profundos para ambos os módulos, indicando que a orientação favorável da superfície já não é mantida durante todo o

ciclo. Esse comportamento decorre da amplificação cinemática típica das regiões mais externas da asa, nas quais pequenas rotações do corpo produzem variações angulares locais mais intensas (Meirovitch, 2001).

Figura 26 – Influência da frequência e da amplitude de batimento na potência elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos (configuração 3).



Fonte: Próprio autor.

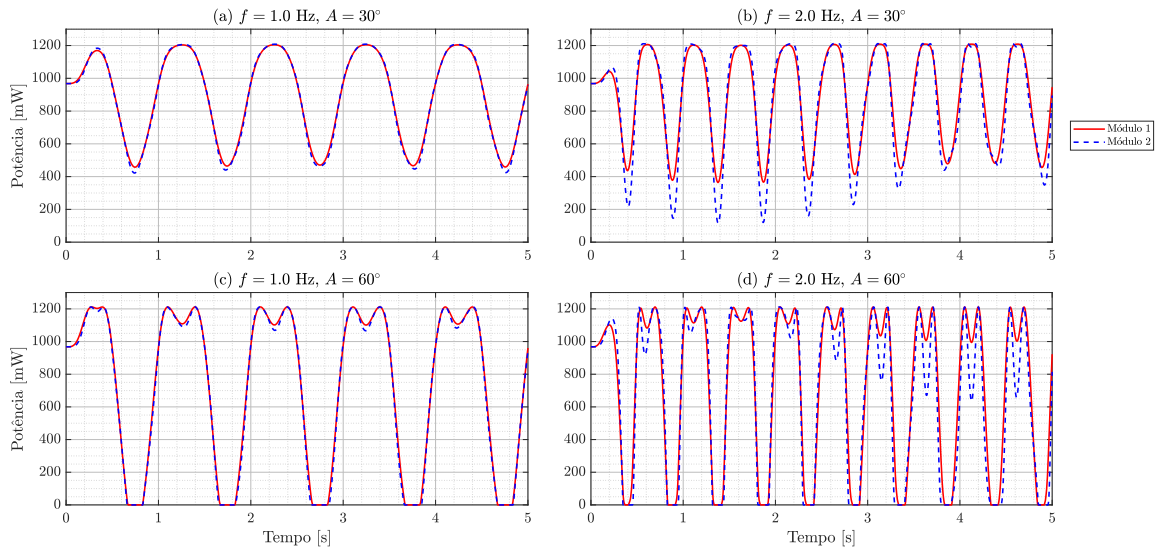
Para $f = 2 \text{ Hz}$ e $A = 30^\circ$ (Figura 26b), o regime apresenta sucessivas quedas abruptas de potência próximas de zero. O sistema passa a alternar rapidamente entre instantes de geração elevada e intervalos de baixa captação solar, caracterizando perda recorrente de incidência efetiva. Nessa condição, a orientação da superfície frequentemente se aproxima de posições ortogonais ou opostas ao vetor solar ao longo do ciclo de batimento.

Nos casos de maior amplitude (Figura 26c), mesmo em baixa frequência, a potência passa a ocorrer em janelas temporais estreitas dentro de cada período, separadas por intervalos sem geração. A contribuição energética deixa de ser distribuída ao longo do ciclo e passa a concentrar-se apenas em faixas específicas de orientação favorável.

Finalmente, para $f = 2 \text{ Hz}$ e $A = 60^\circ$ (Figura 26d), estabelece-se um regime fortemente intermitente, no qual a potência se manifesta como pulsos estreitos de alta intensidade separados por longos períodos de potência nula. A eficiência média de captação torna-se severamente reduzida, evidenciando que, nas regiões mais externas da asa, regimes cinemáticos agressivos inviabilizam a geração contínua e passam a limitar energeticamente a configuração do sistema.

A Figura 27 mostra a potência elétrica gerada para a quarta combinação de posicionamento, caracterizada por módulos alocados em regiões mais internas da asa (Figura 23d).

Figura 27 – Influência da frequência e da amplitude de batimento na potência elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos (configuração 4).



Fonte: Próprio autor.

Para os casos de menor amplitude (Figura 27a), a potência apresenta comportamento periódico e relativamente suave, com oscilações moderadas em torno de um valor médio elevado e forte concordância entre os módulos. Embora ocorram variações ao longo do ciclo, a superfície mantém orientação favorável durante a maior parte do tempo, caracterizando um regime de geração predominantemente contínua. Esse comportamento confirma que regiões mais próximas da raiz sofrem menores variações angulares locais.

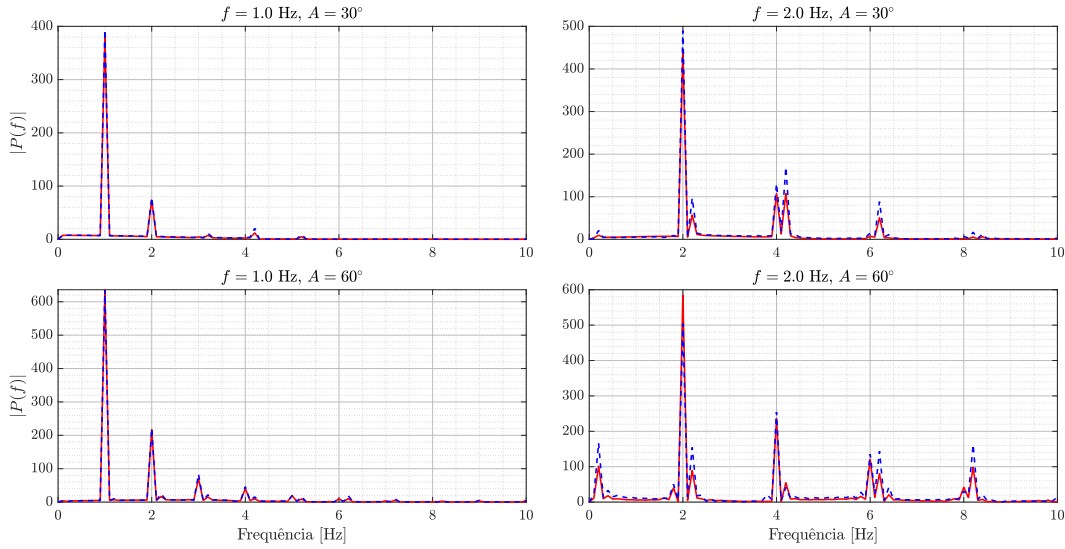
Com o aumento da frequência para $f = 2$ Hz (Figura 27b), surgem vales mais pronunciados, porém ainda menos severos que nos blocos externos. Mesmo assim, os módulos mantêm comportamento bastante similar e a produção média continua elevada, evidenciando menor sensibilidade dinâmica em comparação às regiões distais da asa.

Para $A = 60^\circ$ e baixa frequência (Figura 27c), a potência passa a apresentar intervalos próximos de zero dentro de cada ciclo, embora ainda concentrados em janelas curtas. A geração deixa de ser contínua, mas permanece dominante durante parte significativa do período, mostrando que mesmo regiões internas podem sofrer perda momentânea de incidência solar quando submetidas a grandes excursões angulares.

Finalmente, para $f = 2$ Hz e $A = 60^\circ$ (Figura 27d), estabelece-se um regime intermitente, com sucessivas anulações de potência separadas por pulsos de geração. Apesar dessas perdas temporárias, as janelas de geração são mais largas e regulares que nos blocos mais externos, indicando maior robustez energética relativa. Assim, embora não imune a regimes cinemáticos agressivos, a região interna da asa ainda representa a configuração mais favorável para instalação de módulos fotovoltaicos, por preservar maior fração útil do ciclo de batimento (Lentink *et al.*, 2007; Shyy *et al.*, 2013).

A Figura 28 mostra o espectro em frequência obtido para cada uma das quatro condições de batidas com os pares frequência (Hz) e amplitude (graus) (f_i, A_i) , $i = 1, 2$, sendo $(1, 30)$, $(1, 60)$, $(2, 30)$ e $(2, 60)$, para a configuração 1 (Figura 23a).

Figura 28 – Espectro de potência elétrica para a configuração 1.

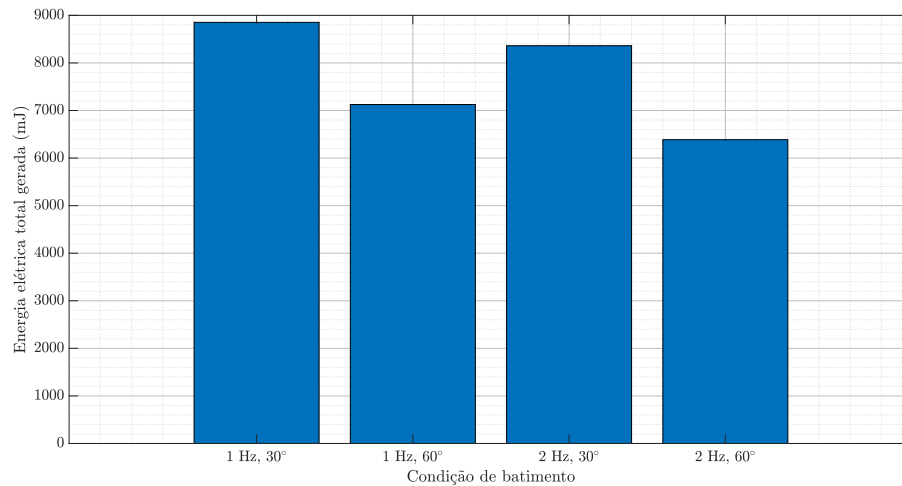


Fonte: Próprio autor.

Nota-se que a frequência de batida é dominante em termos de amplitude espectral, e que existem componentes harmônicas introduzidas pela dinâmica não linear imposta pela maneira que variam os vetores normais em termos do ângulo local de batimento. Tal ângulo difere-se do ângulo de batida, imposto na extremidade esquerda da estrutura, na medida que se tem a flexibilidade do sistema. Os harmônicos apresentam-se, predominantemente, como múltiplos pares da frequência de batida. No entanto, devido o escopo deste trabalho, não se aprofundou nas análises para se alcançar explicações completas, limitando-se, portanto, à identificação destes efeitos. Assim, tem-se neste ponto um interessante aspecto para se avançar em trabalhos futuros. Para isso, considera-se importante considerar a dinâmica estrutural da célula fotovoltaica, que nestas simulações computacionais se considerou desprezível.

A Figura 29 mostra a energia total calculada para a configuração 1 (Figura 23a), que considera as células solares na região intermediária da viga. Tal energia é obtida a partir da expressão $E = \int_0^{t_{max}} P(t)dt$, e a sequência das barras considera $f_1 = 1$ Hz, $f_2 = 2$ Hz, além de $A_1 = 30^\circ$ e $A_2 = 60^\circ$.

Figura 29 – Energia total para a configuração 1, calculadas para as condições de batidas com os pares frequência (Hz) e amplitude (graus) (f_i, A_i) , $i = 1, 2$, sendo $(1, 30)$, $(1, 60)$, $(2, 30)$ e $(2, 60)$ a partir da esquerda.



Fonte: Próprio autor.

Assim como observados nos históricos temporais de potência, nota-se que o aumento da frequência diminui a geração de energia, enquanto o aumento da amplitude de batida também. Para as combinações consideradas, de amplitude e frequência, tem-se que o aumento da amplitude de batida se mostrou mais efetivo para reduzir a geração energética, quando se compara com o aumento da frequência. Os resultados para as configurações 2 a 4 mostram resultados semelhantes.

Com o objetivo de sintetizar e comparar quantitativamente o desempenho energético das diferentes configurações de posicionamento dos módulos fotovoltaicos, foram calculadas métricas agregadas a partir dos sinais temporais de potência simulados. Em particular, para cada configuração de posicionamento das células solares, frequência de excitação e amplitude de batida, determina-se a energia total gerada ao longo do intervalo de simulação, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Energia total gerada para diferentes configurações de posicionamento das células solares, frequências de excitação e amplitudes de batida.

Configuração	$f = 1 \text{ Hz}$		$f = 2 \text{ Hz}$	
	$A = 30^\circ$	$A = 60^\circ$	$A = 30^\circ$	$A = 60^\circ$
1	8,86 J	7,12 J	8,36 J	6,39 J
2	8,86 J	7,14 J	8,43 J	6,47 J
3	8,82 J	7,07 J	8,16 J	6,08 J
4	8,91 J	7,22 J	8,70 J	6,89 J

Fonte: Próprio autor.

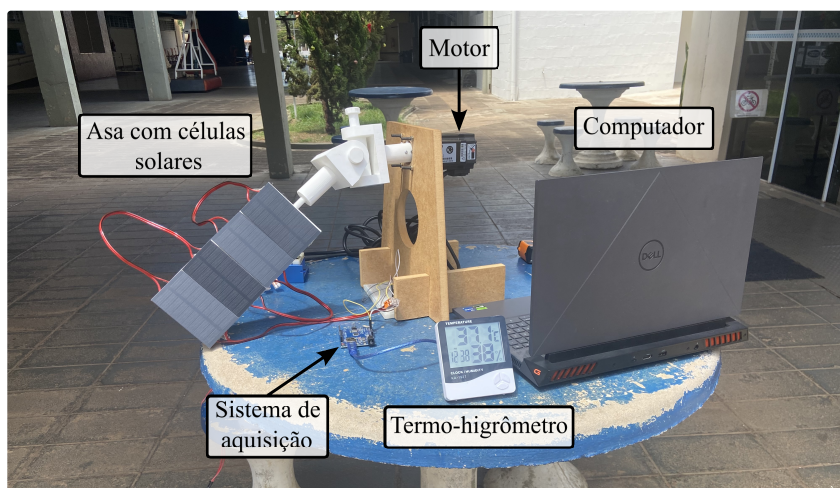
3.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.2.1 Bancada Experimental

Esta seção apresenta os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios conduzidos em bancada com células fotovoltaicas operando em condições estacionária e oscilatória, com o objetivo de avaliar o impacto do movimento de batimento de asas na geração de potência elétrica. Diferentemente das análises numéricas previamente discutidas, esses resultados apresentados incorporam efeitos físicos reais associados à instrumentação, às condições ambientais, às incertezas experimentais e às excitações eletromecânicas do sistema de acionamento. A abordagem experimental adotada permite, portanto, verificar tendências e também identificar limitações práticas e fenômenos não idealizados, como flutuações de irradiância, variações térmicas e ruídos induzidos pelo movimento estrutural, reconhecidos como fatores críticos em sistemas fotovoltaicos embarcados.

Os ensaios experimentais foram conduzidos utilizando a bancada apresentada na Figura 30, que permitiu a reprodução controlada do movimento oscilatório da asa equipada com células solares, bem como a aquisição simultânea das grandezas elétricas e ambientais relevantes. O sistema foi projetado de modo a impor uma cinemática prescrita à asa por meio de um motor elétrico, enquanto a potência elétrica gerada pelas células fotovoltaicas permaneciam continuamente monitorada durante os testes.

Figura 30 – Bancada experimental utilizada nos ensaios de geração de potência elétrica.



Fonte: Próprio autor.

A bancada possibilitou a realização de dois conjuntos principais de experimentos: ensaios com a célula solar em condição estacionária, representando um cenário idealizado de captação solar, e ensaios com a célula integrada à asa oscilante, reproduzindo condições análogas às encontradas em VANTs bioinspirados com batimento de asas. Em ambos os casos, os sinais de tensão e corrente foram adquiridos por um sistema dedicado, permitindo o cálculo da potência elétrica instantânea ao longo do tempo.

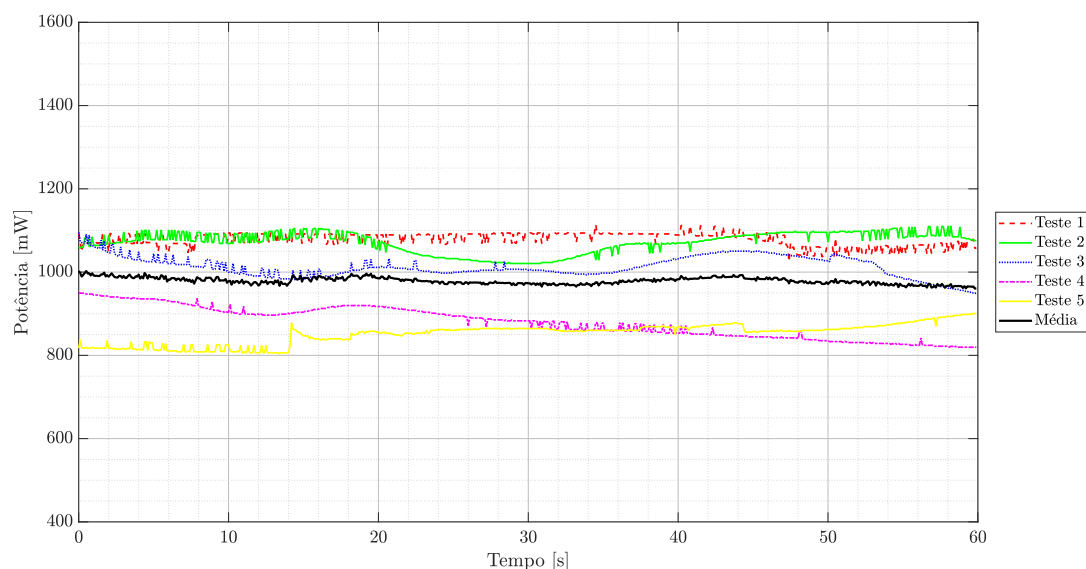
Adicionalmente, instrumentos auxiliares foram empregados para o monitoramento das condições ambientais durante os experimentos, incluindo medições de irradiância solar incidente, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e temperatura da célula solar. A aquisição simultânea dessas variáveis permitiu avaliar a estabilidade das condições de ensaio e identificar possíveis influências externas sobre o comportamento elétrico observado, assegurando maior confiabilidade à interpretação dos resultados experimentais apresentados a seguir. Detalhes do sistema de aquisição de dados empregado são apresentados na seção 3.2.2.

Durante a operação da bancada, alguns efeitos não idealizados inerentes ao sistema mecânico foram observados. Entre eles destacam-se pequenas folgas na junta articulada, atrito mecânico no mecanismo de transmissão e vibrações estruturais induzidas pelo motor elétrico durante a operação em frequências mais elevadas. Tais efeitos podem introduzir pequenas variações na cinemática real da asa em relação ao movimento ideal prescrito. No entanto, verificou-se experimentalmente que essas perturbações não comprometeram a repetibilidade dos ensaios nem a análise das tendências gerais do comportamento energético do sistema fotovoltaico.

Apesar dessas limitações, a bancada apresentou boa robustez estrutural e permitiu a realização de ensaios repetitivos sob condições controladas. A modularidade do sistema possibilitou a realização tanto de testes estacionários quanto dinâmicos, permitindo comparar diretamente o desempenho elétrico das células fotovoltaicas sob diferentes condições de operação. Além disso, o projeto da bancada permitiu fácil acesso aos módulos fotovoltaicos e aos sensores de instrumentação, facilitando a instalação dos equipamentos de medição e a realização de ajustes experimentais durante a campanha de testes.

A Figura 31 apresenta a evolução temporal da potência elétrica gerada pela célula fotovoltaica operando em condição estacionária, correspondente a um cenário idealizado de captação solar sem movimento relativo da superfície coletora. Esses resultados servem como referência experimental para a avaliação do desempenho energético do sistema fotovoltaico, uma vez que eliminam efeitos dinâmicos associados à variação angular, excitações mecânicas e flutuações induzidas pelo movimento estrutural. Além de alterações possíveis por pequenas variações na potência elétrica instantânea gerada, nota-se que a instrumentação empregada exibiu alguma distorção nas medições, bem como apresentou alguns pequenos picos de amplitude durante a aquisição dos sinais. Neste sentido, tem-se que a curva média, obtida pela média dos sinais medidos, ponto a ponto ao longo do tempo, apresenta um comportamento mais estável em termos de variações de amplitude.

Figura 31 – Potência elétrica gerada ao longo do tempo para ensaios estacionários da célula solar, com sobreposição das cinco repetições experimentais e da curva média.



Fonte: Próprio autor.

As cinco repetições das medições realizadas exibem níveis médios de potência similares entre si, com valores de 1078,99 mW, 1071,49 mW, 1013,14 mW, 879,15 mW e 852,14 mW para os Testes 1 a 5, respectivamente. A curva média resultante apresenta valor médio global de 978,98 mW, evidenciando alguma estabilidade do processo de geração elétrica na ausência de movimento imposto à célula solar.

Este comportamento decorre do fato de que, em condição estacionária, a irradiância efetiva incidente sobre a superfície ativa da célula permanece aproximadamente constante, sendo limitada apenas por pequenas variações ambientais inevitáveis, como oscilações de irradiância local, turbulência atmosférica de pequena escala e ruído instrumental do sistema de medição. Do ponto de vista físico, a potência gerada por uma célula fotovoltaica depende diretamente da irradiância incidente e da temperatura da junção semicondutora (Green, 1981). Como não há variação significativa do ângulo de incidência solar nem excitação mecânica da estrutura, não se observam efeitos dinâmicos adicionais capazes de alterar a potência elétrica de forma sistemática, especialmente pelo tempo de medição ser relativamente pequeno.

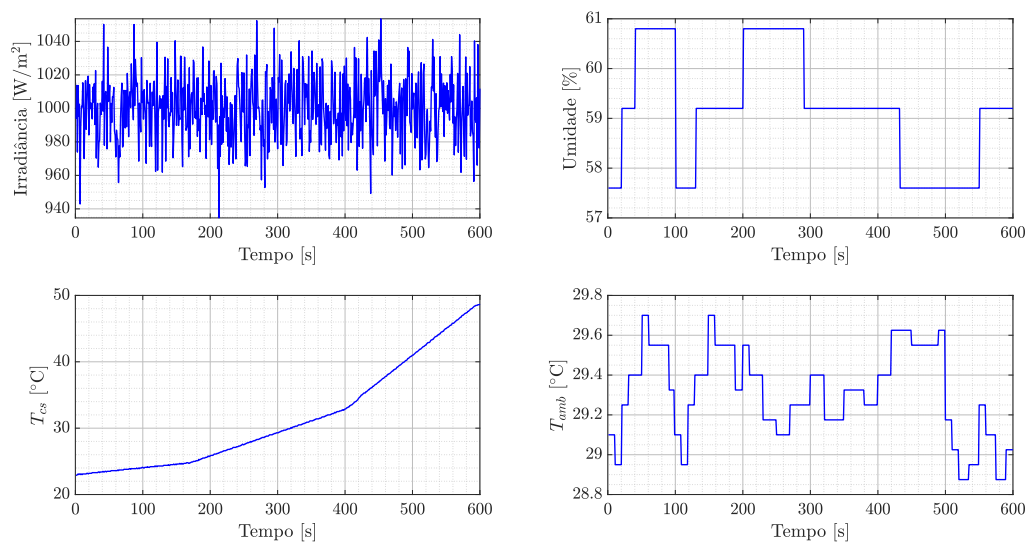
A variabilidade observada nos ensaios estacionários decorre de flutuações naturais da irradiância solar, variações térmicas da célula (cujo aumento da temperatura da superfície infere em menor eficiência) e pequenas oscilações angulares não intencionais, que devem ter gerado ruídos de medições especialmente devido a simplicidade do sistema de aquisição de dados empregado. As cinco repetições experimentais foram realizadas de forma sequencial, sob condições ambientais similares, sendo a média utilizada como referência representativa.

Os resultados estacionários fornecem uma referência experimental fundamental, visto que representa uma condição idealizada de captação energética. A estabilidade observada na potên-

cia indica que, na ausência de oscilação, o sistema fotovoltaico pode operar em regime quase estacionário, favorecendo estratégias de extração de máxima potência mais simples. Entretanto, tal condição não é factível para VANTs bioinspirados, pois o movimento das asas introduz variações cinemáticas significativas que inevitavelmente alteram a orientação solar e, consequentemente, a potência disponível (Zhang; Hu, 2016; Perez-Rosado; Bruck; Gupta, 2016).

A Figura 32 apresenta a evolução temporal das variáveis ambientais monitoradas durante o ensaio experimental, incluindo irradiância solar, umidade relativa do ar, temperatura da célula fotovoltaica e temperatura ambiente. A inclusão dessas grandezas tem como objetivo contextualizar fisicamente os resultados de potência elétrica, estabelecendo as condições de contorno sob as quais os ensaios foram conduzidos. Mesmo em experimentos de curta duração, variações térmicas e de irradiância podem influenciar significativamente o desempenho elétrico de células fotovoltaicas, tornando essencial sua apresentação conjunta com os resultados energéticos.

Figura 32 – Evolução temporal das variáveis ambientais medidas durante o ensaio oscilatório: irradiância solar, umidade relativa do ar, temperatura da célula solar e temperatura ambiente.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que a irradiância solar apresenta flutuações em torno de um valor médio próximo de 1000 W/m^2 , com variações de amplitude ao longo do intervalo de ensaio. A umidade relativa do ar exibe comportamento praticamente constante, com variações discretas em patamares, associadas à resolução do instrumento de medição. A temperatura da célula fotovoltaica apresenta crescimento ao longo do tempo, enquanto a temperatura ambiente permanece aproximadamente constante, com pequenas oscilações em torno de 29°C .

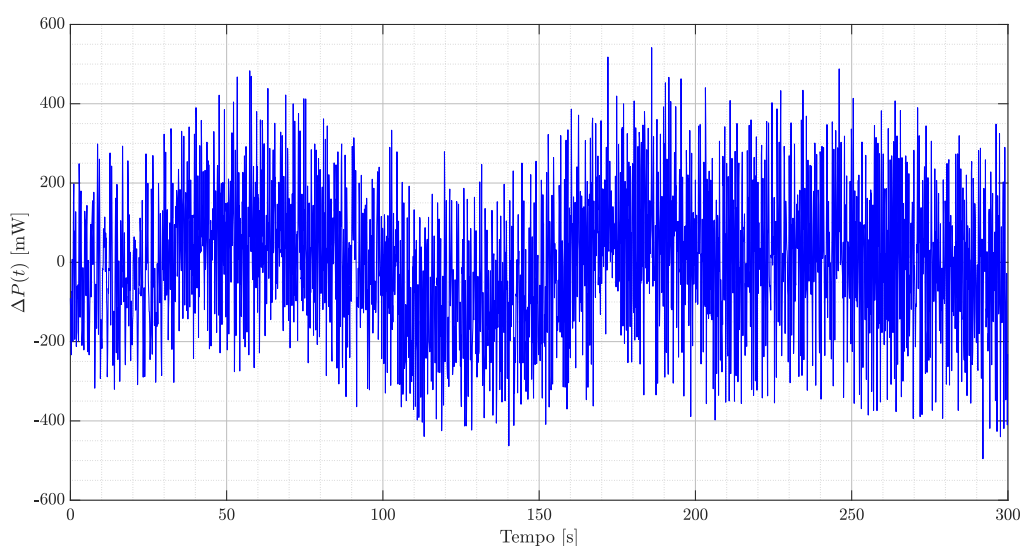
O comportamento da irradiância reflete a variabilidade natural das condições solares durante medições em ambiente externo, mesmo sob céu predominantemente limpo, sendo influenciado por microvariações atmosféricas, espalhamento difuso e posicionamento do sensor, conforme

destacam Duffie e Beckman (2013). O aumento progressivo da temperatura da célula fotovoltaica está associado ao balanço térmico do dispositivo, no qual a absorção de radiação solar deve superar os mecanismos de dissipação por convecção natural e radiação térmica ao longo do tempo, conforme relatam Skoplaki e Palyvos (2009).

Segundo Green (1982), o aumento da temperatura da célula fotovoltaica implica uma redução gradual da tensão de circuito aberto e, consequentemente, da potência máxima disponível. Assim, mesmo na presença de irradiância aproximadamente constante, a evolução térmica da célula constitui um fator relevante para a interpretação dos resultados de potência elétrica medidos nos ensaios oscilatórios. Esse efeito térmico reforça a necessidade de considerar explicitamente a temperatura da célula em análises experimentais e modelagens energéticas de sistemas fotovoltaicos embarcados.

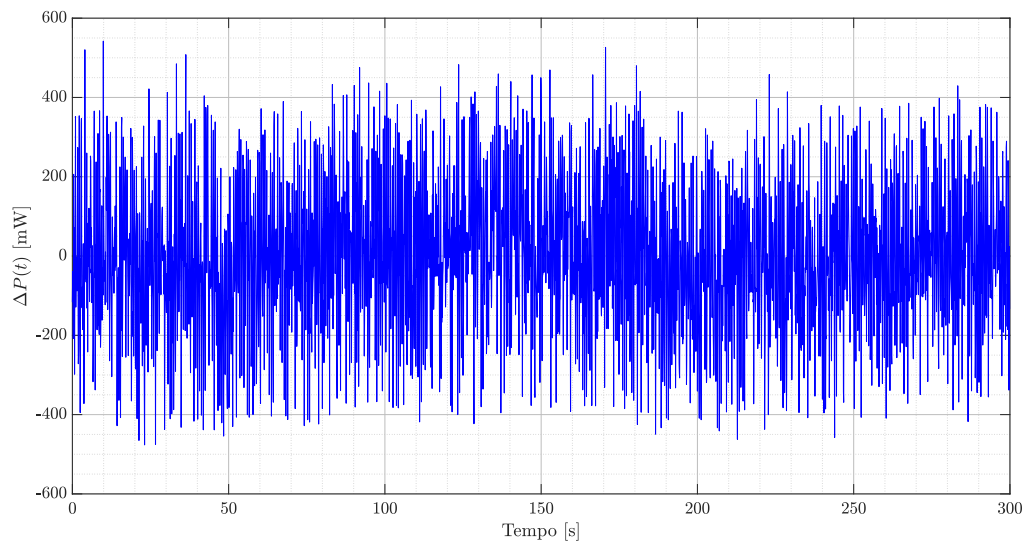
As Figuras 33 a 35 mostram a variação das potências obtidas respectivamente para as frequências de batida de 0,5 Hz, 1 Hz e 2 Hz, considerando a amplitude 30°. Tais sinais foram obtidos a partir da subtração da respectiva média do sinal originalmente medido, que são respectivamente 924,098 mW, 1133,933 mW e 1057,336 mW. Ainda, cada sinal medido, com frequência de amostragem de 10 Hz, foi numericamente reamostrado considerando um passo de tempo de 0,1/100 s, uma vez que o passo de tempo experimental foi de aproximadamente 0,1 segundos. Esse procedimento se deu especialmente porque o passo tempo experimental não estava exatamente constante.

Figura 33 – Variação temporal da potência elétrica em torno do valor médio, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 0,5 Hz.



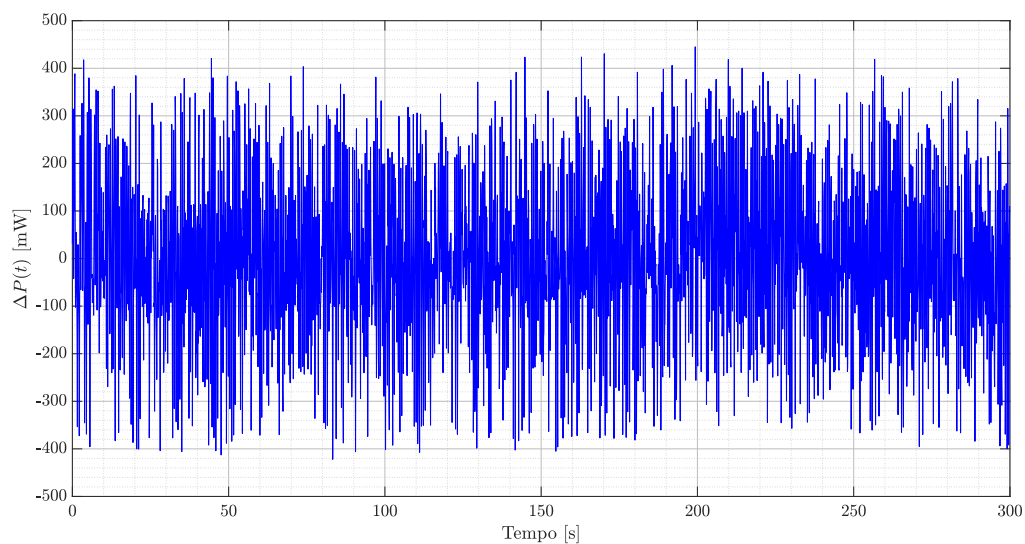
Fonte: Próprio autor.

Figura 34 – Variação temporal da potência elétrica em torno do valor médio, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 1 Hz.



Fonte: Próprio autor.

Figura 35 – Variação temporal da potência elétrica em torno do valor médio, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 2 Hz.

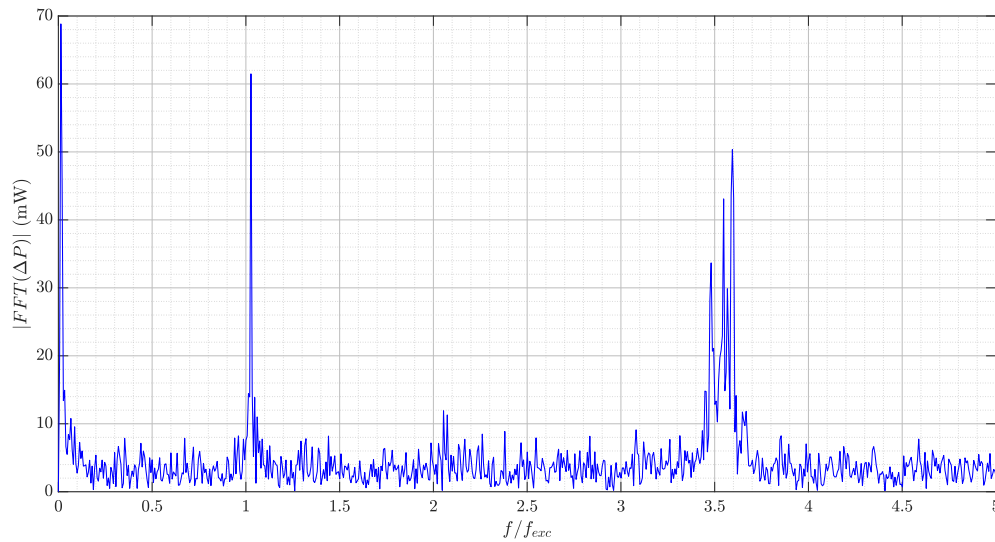


Fonte: Próprio autor.

As frequências e amplitudes analisadas foram selecionadas com base nas estimativas operacionais do protótipo físico em desenvolvimento, apresentando faixa operacional entre 1 e 4 Hz e amplitude máxima de aproximadamente 45° (Jensen; Dyre; Hecksher, 2024). Considerando esses sinais temporais apresentados, foi possível calcular os respectivos espectros em frequência a partir da transformada rápida de Fourier. As Figuras 36 a 38 mostram as respectivas magni-

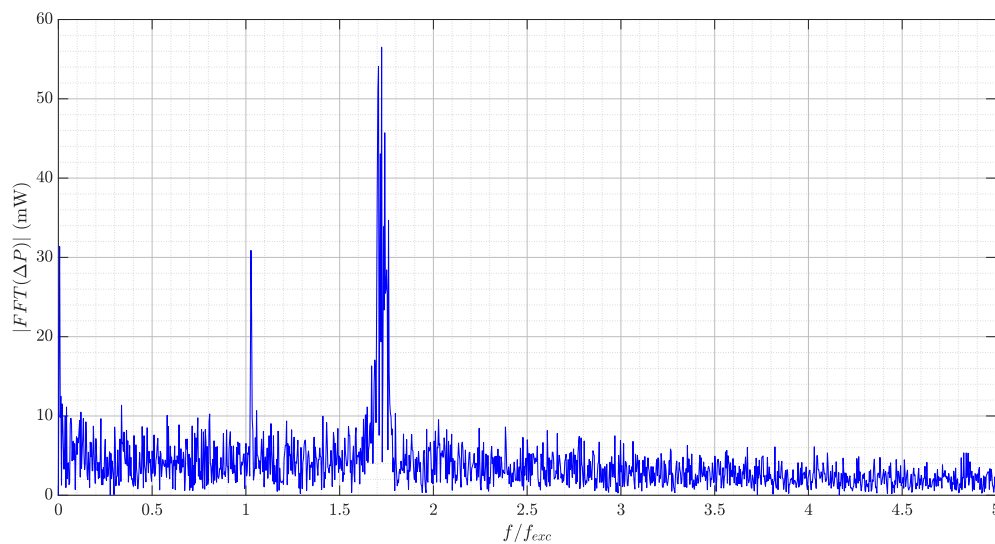
tudes dos espectros, com o eixo horizontal (das frequências) normalizado por cada respectiva frequência de batida.

Figura 36 – Espectro em frequência para a variação temporal da potência elétrica experimental, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 0,5 Hz.



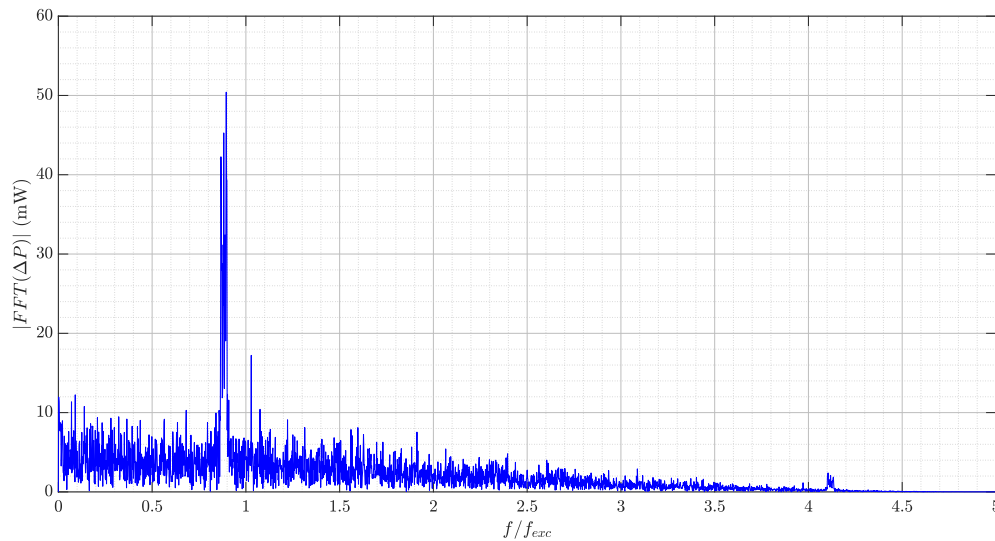
Fonte: Próprio autor.

Figura 37 – Espectro em frequência para a variação temporal da potência elétrica experimental, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 1 Hz.



Fonte: Próprio autor.

Figura 38 – Espectro em frequência para a variação temporal da potência elétrica experimental, considerando uma amplitude de batida de 30° e frequência de 2 Hz.



Fonte: Próprio autor.

Nota-se nos três resultados que existe uma componente espectral na frequência de batida f_b , sendo ela dominante especialmente para as frequências de 0,5 e 2 Hz. Para $f_b = 2$ Hz (Figura 38), a componente espectral dominante se apresenta em aproximadamente $0,9f_b$. No entanto, destaca-se que amplitude e a frequência do movimento não foram, de fato, medidas (em termos de amplitude/frequência realizadas na estrutura), mas apenas impostas experimentalmente via um código computacional desenvolvido em ambiente Arduino IDE, com extensão AccelStepper e uma placa Raspberry Pi, para o gerenciamento do motor elétrico empregado no aparato experimental (ver Figura 30). Então, tem-se que, provavelmente, nesta condição a frequência do movimento realizado não alcançou o valor desejado, tendo então sido menor.

Ainda, nos três casos se identificam amplitudes que supostamente são componentes espectrais devido às não linearidades, conforme se verificou no resultado teórico apresentado na Figura 28. No entanto, o considerável nível de ruído, bem como a relativamente baixa frequência de amostragem – limitada pela instrumentação empregada – limitou uma análise completa. Ainda, a Figura 37 mostra que para a frequência de batida de 1 Hz existe uma componente (ou mais de uma), em torno de 1,7 Hz, com magnitude maior que aquela para 1 Hz. Além disso, tanto esta componente em 1,7 Hz, bem como a componente espectral em torno de $3,5f_b$ na Figura 36, exibem um aparente espalhamento, que apresenta alguma semelhança com os picos lado a lado, observados nos espectros teóricos. No entanto, consideradas as limitações do sistema de aquisição de dados empregado, bem como o escopo deste trabalho, limitou-se a observar e relatar esses aspectos, sem portanto avançar nas análises.

3.2.2 Sistema de Aquisição de Dados

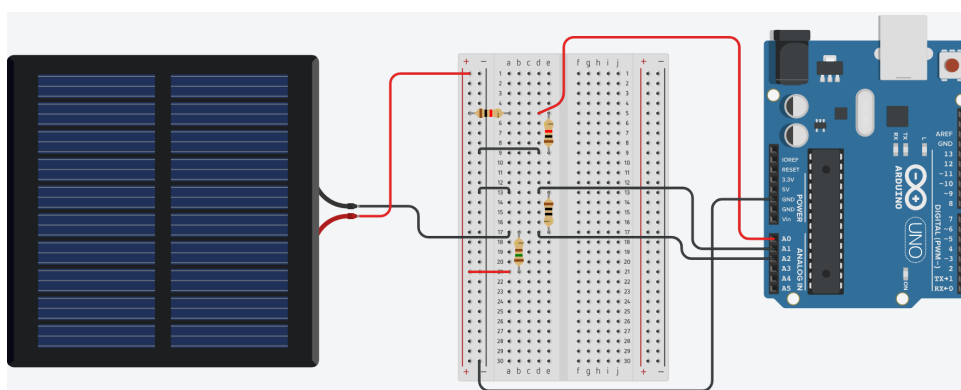
O sistema de aquisição de dados foi desenvolvido de forma dedicada, com foco em simplicidade construtiva, confiabilidade das medições e integração eficiente aos demais subsistemas experimentais. A arquitetura adotada se baseia em um microcontrolador Arduino Uno, operando em conjunto com um circuito elétrico dedicado à medição das grandezas elétricas (tensão, corrente e potência) geradas pelo módulo fotovoltaico durante os ensaios.

A estratégia de instrumentação empregada utiliza componentes passivos de baixo custo e fácil implementação, consistindo em um resistor de carga, um resistor de derivação (*shunt*) e um divisor resistivo de tensão. Essa configuração permite a aquisição simultânea da tensão nos terminais do arranjo fotovoltaico e da corrente elétrica fornecida ao circuito, viabilizando o cálculo da potência elétrica instantânea ao longo do tempo.

A medição da tensão de saída é realizada por meio de um divisor de tensão resistivo, dimensionado de forma a adequar os níveis de tensão do sistema fotovoltaico à faixa operacional das entradas analógicas do microcontrolador (0 – 5 V). Por outro lado, a corrente elétrica é inferida indiretamente a partir da queda de tensão medida sobre o resistor *shunt*, de resistência conhecida ($R_{\text{shunt}} = 10 \, \Omega$), conforme a Lei de Ohm. A utilização de dois pontos de medição nos terminais do resistor permite reduzir efeitos de ruído e melhorar a precisão da estimativa da corrente.

A Figura 39 apresenta o circuito de aquisição de dados utilizado, evidenciando a simplicidade da topologia adotada e a organização dos componentes de medição. O microcontrolador foi programado para realizar leituras periódicas das entradas analógicas correspondentes à tensão e à corrente, convertendo os sinais brutos em grandezas físicas por meio de fatores de escala previamente definidos. O processamento é realizado em tempo real, resultando no cálculo instantâneo da potência elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico. Os dados processados são então transmitidos via comunicação serial para um computador, onde são armazenados e posteriormente analisados em ambiente *MATLAB*®.

Figura 39 – Circuito de aquisição de dados elétricos.



Fonte: Próprio autor.

A taxa de amostragem foi configurada em 10 Hz, essa escolha permite capturar adequadamente as variações temporais da potência elétrica, ao mesmo tempo em que reduz o volume de dados e a suscetibilidade a ruídos de alta frequência.

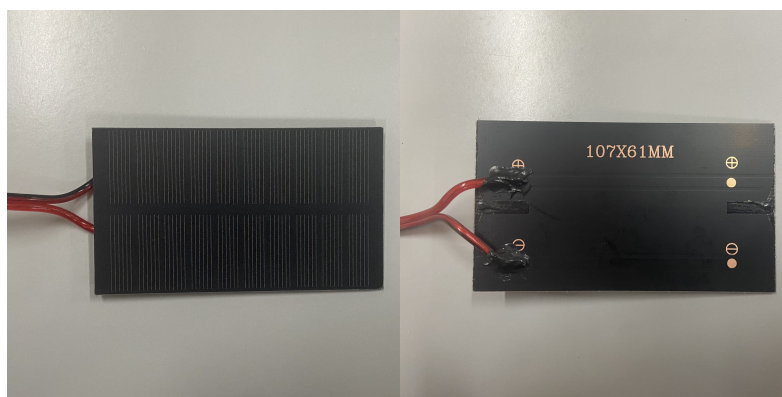
A calibração do sistema de aquisição foi realizada com base nos valores nominais dos componentes empregados no divisor resistivo e no resistor *shunt*, utilizando as especificações fornecidas pelos fabricantes. Os fatores de conversão adotados no processamento dos dados foram determinados a partir das relações teóricas do circuito, considerando a tensão de referência do conversor analógico-digital do Arduino Uno ($V_{ref} = 5\text{ V}$) e a resolução de 10 bits do conversor analógico-digital.

3.2.3 Desenvolvimento do Protótipo do Sistema MPPT

O subsistema de geração fotovoltaica foi constituído por quatro módulos solares de silício policristalino, selecionados em função da adequada relação entre eficiência energética, massa e dimensões, características importantes para aplicações embarcadas em plataformas aéreas leves. Cada módulo apresenta dimensões de $107\text{ mm} \times 61\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ e massa aproximada de 0,05 kg, sendo capaz de fornecer tensão de circuito aberto (V_{oc}) de até 5 V e corrente de curto-circuito (I_{sc}) de aproximadamente 200 mA. Nessas condições, cada célula possui potência máxima nominal da ordem de 1 W e eficiência energética aproximada de 17,05%.

Os módulos foram montados sobre uma estrutura suporte rígida e conectados eletricamente em uma configuração mista de ligações em série e paralelo, de forma a atender simultaneamente aos requisitos de tensão e corrente impostos pelo estágio de conversão associado ao sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Essa configuração permite adequar o nível de tensão do arranjo fotovoltaico à faixa operacional do circuito eletrônico de conversão e armazenamento de energia. A Figura 40 apresenta uma das células fotovoltaicas utilizadas no protótipo experimental.

Figura 40 – Placa solar utilizada no sistema.



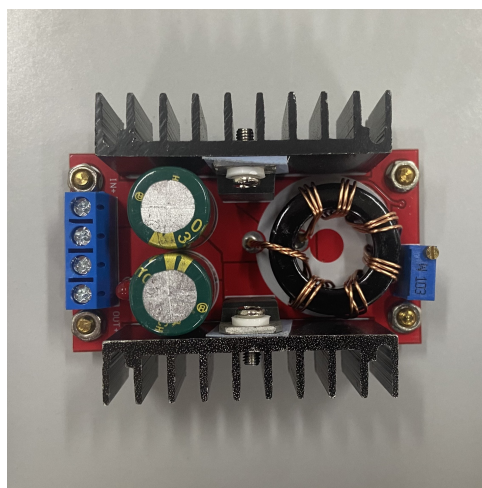
Fonte: Próprio autor.

As conexões elétricas entre os módulos foram realizadas por meio de condutores de baixa bitola, com isolamento adequado para mitigar efeitos de oxidação, umidade e vibração mecânica.

nica. Essa abordagem mostrou-se adequada para ensaios experimentais em ambiente externo, assegurando estabilidade elétrica ao longo dos testes.

Para a conversão e o gerenciamento da potência gerada, utilizou-se um conversor CC–CC do tipo *step-up (boost)*, responsável por elevar e regular a tensão proveniente do arranjo fotovoltaico. O dispositivo opera com tensão de entrada na faixa de 10 a 32 V e fornece tensão de saída ajustável entre 12 e 35 V, apresentando capacidade de processamento de potência de até 150 W e corrente máxima de saída de 6 A. Nesse contexto, o conversor CC–CC constitui o núcleo funcional do sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), pois atua diretamente na adaptação da impedância elétrica vista pelos módulos fotovoltaicos. A Figura 41 ilustra o conversor empregado no protótipo experimental.

Figura 41 – Conversor Boost CC-CC.



Fonte: Próprio autor.

A energia convertida é direcionada ao subsistema de armazenamento, composto por uma bateria de polímero de lítio (Li–Po) do tipo 2S, com tensão nominal de 7,4 V e capacidade de 2200 mAh. A bateria utilizada (modelo LB2200LP2, Leão Modelismo) possui duas células em série em um único *pack*, taxa de descarga de até 30C, conector do tipo XT-60 e massa aproximada de 99 g, apresentando dimensões compactas de aproximadamente 74 mm × 32 mm × 18 mm.

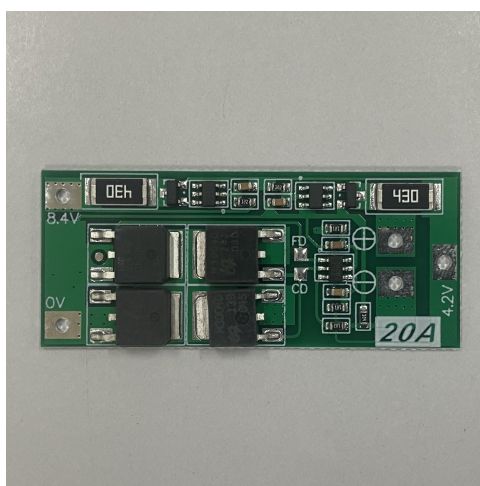
Associada à bateria, foi empregada uma placa de gerenciamento de bateria (BMS, do inglês *Battery Management System*), modelo 2S 20A *Lithium Battery* (SAMIORE ROBOT), projetada para operação em sistemas de duas células em série, com faixa de tensão de operação entre 4,2 e 8,4 V e corrente máxima de descarga contínua de até 20 A. Essa placa é responsável pela proteção elétrica do sistema, realizando funções de controle de sobretensão, subtensão e balanceamento das células, garantindo maior segurança e estabilidade durante os processos de carga e descarga da bateria. As Figuras 42 e 43 apresentam, respectivamente, a bateria empregada no protótipo experimental e a placa de gerenciamento utilizada no subsistema de armazenamento de energia.

Figura 42 – Bateria Li-Po 2200 mAh.



Fonte: Próprio autor.

Figura 43 – Placa de proteção BMS.



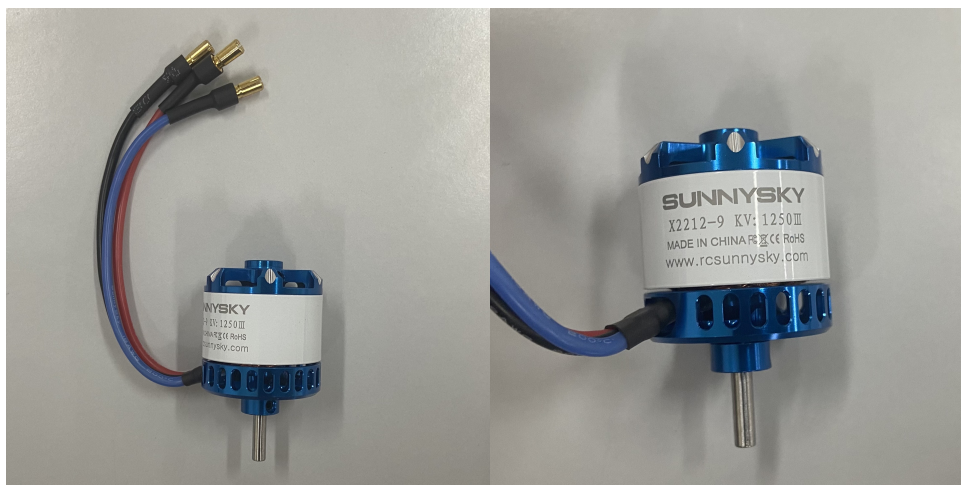
Fonte: Próprio autor.

Com o objetivo de representar uma condição realista de consumo energético, o sistema MPPT foi integrado a um subsistema motopropulsor, composto por um motor elétrico *brushless* modelo SunnySky X2212-III (1250 KV), amplamente empregado em plataformas aéreas de pequeno porte devido à sua relação favorável entre massa, dimensões e potência. O motor apresenta massa de aproximadamente 59 g, dimensões de 27,5 mm de diâmetro por 30 mm de comprimento e eixo com diâmetro de 3,17 mm. Quando alimentado, pode operar com corrente máxima de até 35 A, fornecendo potência de até 518 W e empuxo máximo aproximado de 1350 g.

O acionamento do motor é realizado por meio de um controlador eletrônico de velocidade (ESC, do inglês *Electronic Speed Control*) do tipo *brushless* com corrente nominal de 40 A e corrente de pico de até 50 A por curtos intervalos de tempo. O controlador incorpora um circuito

BEC (*Battery Eliminator Circuit*) linear integrado, capaz de fornecer tensão regulada de 5 V e corrente de até 3 A para alimentação de circuitos auxiliares. As Figuras 44 e 45 apresentam, respectivamente, o motor elétrico utilizado e o controlador eletrônico de velocidade empregado no subsistema motopropulsor.

Figura 44 – Motor SunnySky X2212-III.



Fonte: Próprio autor.

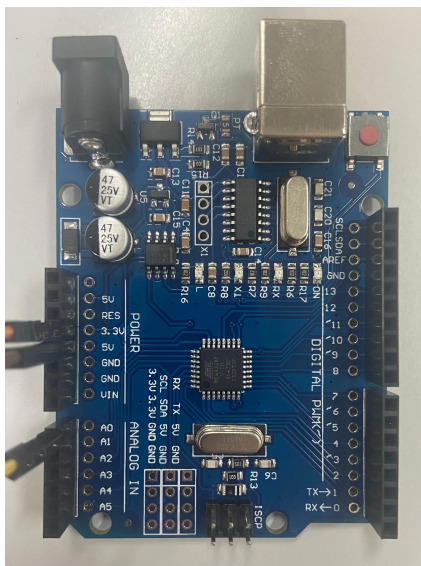
Figura 45 – ESC de 40A com BEC integrado.



Fonte: Próprio autor.

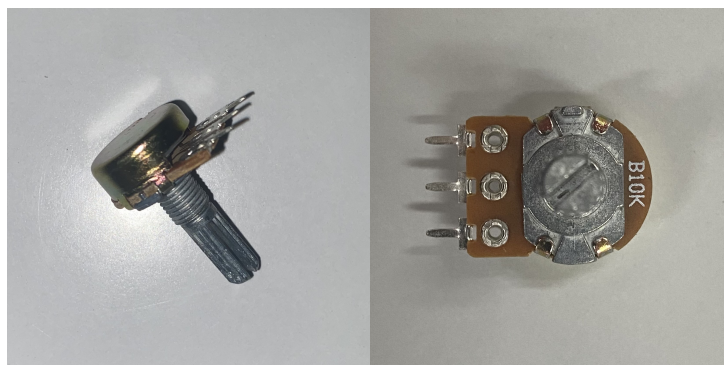
O controle do subsistema de consumo foi realizado por meio de um microcontrolador, associado a um elemento de interface analógica que permitiu o ajuste contínuo da rotação do motor. Essa estratégia viabilizou a imposição de diferentes níveis de solicitação de potência ao sistema, mantendo simplicidade operacional e flexibilidade experimental. A Figura 46 mostra a unidade de controle empregada, enquanto a Figura 47 apresenta o dispositivo utilizado para ajuste manual da demanda.

Figura 46 – Microcontrolador Arduino UNO.



Fonte: Próprio autor.

Figura 47 – Potenciômetro de 10kΩ.

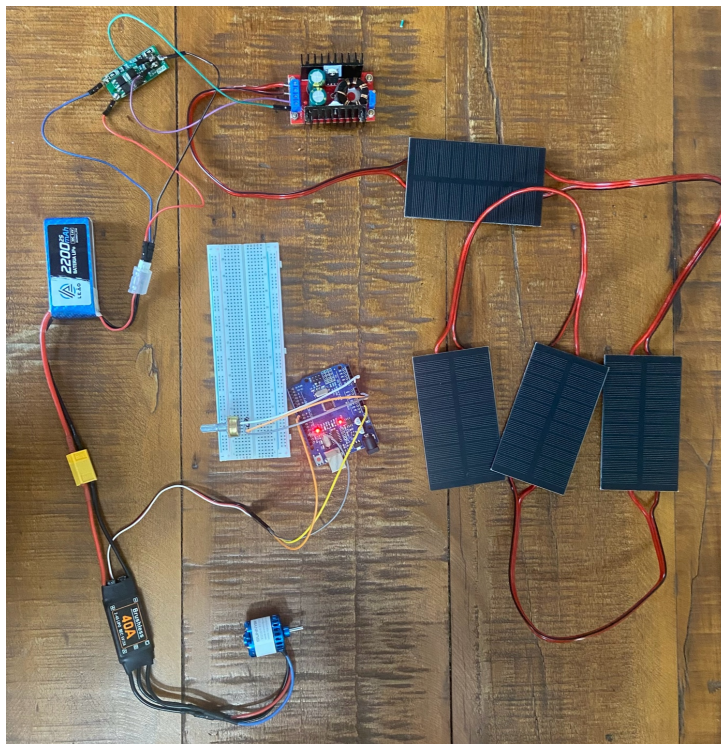


Fonte: Próprio autor.

A integração final dos subsistemas foi organizada de forma modular, conforme ilustrado nos esquemas apresentados na Figura 11, Figura 12 e Figura 13. Esses diagramas evidenciam a separação funcional entre geração, conversão, armazenamento e consumo, facilitando a compreensão do fluxo energético e a identificação de possíveis pontos de instrumentação.

O esquema elétrico completo do sistema MPPT foi apresentado na Figura 14, enquanto a Figura 48 mostra o protótipo físico montado. A implementação final demonstrou viabilidade prática, organização construtiva e robustez suficiente para a realização dos ensaios experimentais subsequentes.

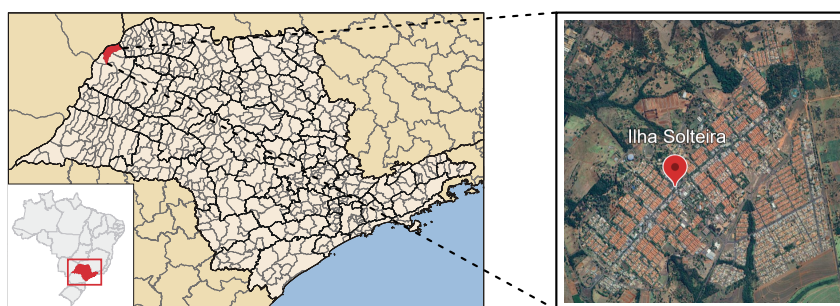
Figura 48 – Sistema MPPT montado.



Fonte: Próprio autor.

Os testes preliminares do sistema foram conduzidos na Estância Turística de Ilha Solteira (SP), região reconhecida por sua elevada disponibilidade de radiação solar ao longo do ano. A Figura 49 apresenta a localização geográfica da área de ensaio.

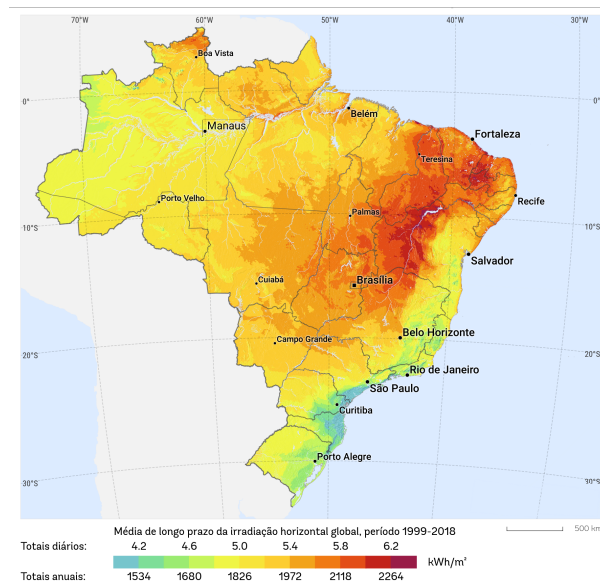
Figura 49 – Localização da Estância Turística de Ilha Solteira em relação ao estado de São Paulo e ao Brasil.



Fonte: Próprio autor.

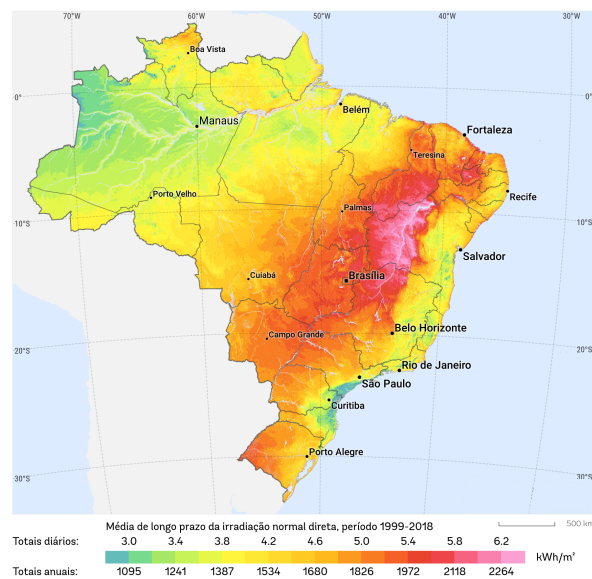
Para contextualizar o potencial solar da região, são apresentados os mapas nacionais de irradiação solar horizontal global (GHI), que representa a soma da radiação direta e difusa em uma superfície horizontal, e irradiação direta normal (DNI), que considera apenas a componente direta da radiação (perpendicular à superfície), mostrados nas Figuras 50 e 51, respectivamente.

Figura 50 – Distribuição da radiação solar horizontal global (GHI) no Brasil.



Fonte: Adaptado de (The World Bank Group, 2018).

Figura 51 – Distribuição da radiação solar direta normal (DNI) no Brasil.



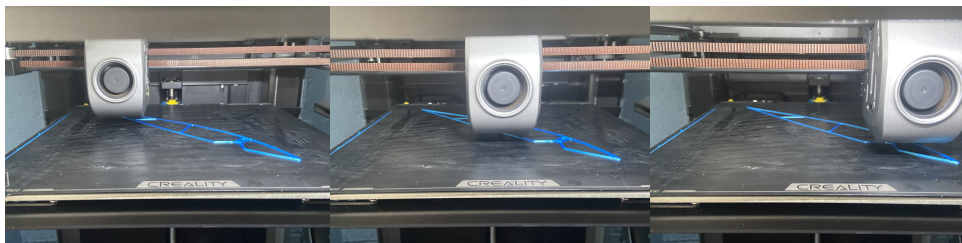
Fonte: Adaptado de (The World Bank Group, 2018).

3.2.4 Protótipo Físico do VANT Bioinspirado

O protótipo físico do VANT bioinspirado foi desenvolvido com foco na viabilidade construtiva, funcional e experimental da plataforma proposta. O material polimérico empregado na fabricação dos componentes estruturais foi selecionado com base em critérios de leveza, rigidez específica, estabilidade dimensional e facilidade de processamento, características adequadas à

prototipagem funcional por manufatura aditiva. Em regiões sujeitas a maiores solicitações mecânicas, como articulações e elementos de transmissão, foram incorporados reforços estruturais por meio de componentes com elevada rigidez específica, visando aumentar a robustez do conjunto sem penalizar significativamente a massa total.

Figura 52 – Etapa de fabricação aditiva dos componentes estruturais.



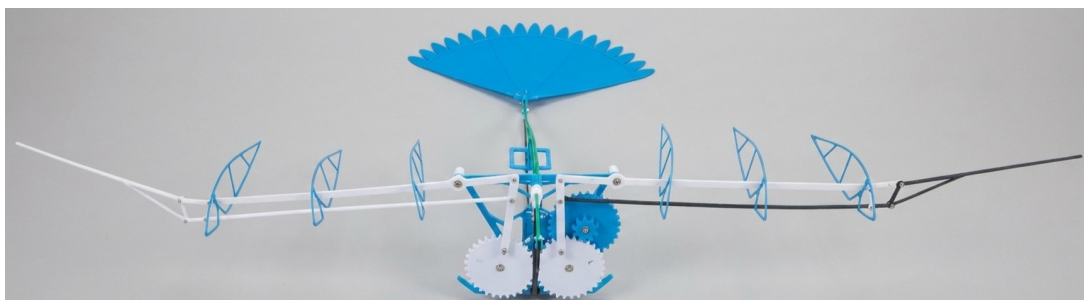
Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros de impressão foram definidos a partir de testes preliminares e ajustados de forma iterativa, buscando um compromisso entre qualidade geométrica, resistência mecânica e redução de massa. Esse processo permitiu identificar configurações adequadas às exigências funcionais do protótipo, assegurando repetibilidade dimensional e integridade estrutural compatíveis com os ensaios subsequentes.

Após a fabricação, os componentes passaram por procedimentos de pós-processamento, incluindo acabamento superficial e ajustes dimensionais, com o objetivo de garantir o correto funcionamento das interfaces de contato, articulações e encaixes. O acabamento mecânico foi realizado de forma progressiva, assegurando suavidade de movimento, redução de atrito em partes móveis e mitigação de interferências decorrentes das imperfeições inerentes ao processo de fabricação aditiva.

O protótipo final, apresentado na Figura 53, demonstrou boa correspondência geométrica com o modelo tridimensional desenvolvido em ambiente CAD, evidenciando a eficácia da abordagem paramétrica adotada nas etapas de projeto. A modularidade do conjunto facilitou os processos de montagem, desmontagem e substituição de componentes, aspecto particularmente relevante para plataformas experimentais em fase de desenvolvimento e refinamento contínuo.

Figura 53 – Protótipo físico final do VANT bioinspirado.



Fonte: Próprio autor.

Do ponto de vista estrutural, os componentes fabricados por manufatura aditiva apresentaram rigidez suficiente para suportar os movimentos oscilatórios impostos pela batida de asa. A utilização de materiais poliméricos possibilitou a obtenção de um conjunto leve, compatível com aplicações em VANTs de pequeno porte, enquanto a incorporação de reforços estruturais em regiões críticas contribuiu para a redução de deformações excessivas em articulações e elementos de transmissão.

O mecanismo de batimento adotado mostrou-se funcional, convertendo de forma consistente o movimento rotacional do atuador em oscilação angular alternada das asas. Observou-se sincronismo satisfatório entre os elos do mecanismo, bem como boa repetibilidade do movimento ao longo dos ciclos de operação. Contudo, pequenas folgas mecânicas, inerentes às tolerâncias do processo de fabricação aditiva e à montagem, resultaram em perdas mecânicas e vibrações residuais, especialmente sob regimes mais severos de operação.

A análise funcional evidenciou que o acabamento superficial das peças desempenhou papel determinante no desempenho global do sistema. Componentes submetidos a pós-processamento adequado apresentaram redução perceptível de atrito nas interfaces móveis, favorecendo a suavidade do movimento e diminuindo a demanda de torque do sistema de acionamento. Em contrapartida, regiões com acabamento insuficiente mostraram tendência a desgaste acelerado, indicando a necessidade de refinamentos adicionais para aplicações de longa duração ou em regimes de operação mais exigentes.

Entre as principais limitações observadas, destacam-se a sensibilidade do sistema a desalinhamentos geométricos, a influência de folgas acumuladas no desempenho dinâmico e a durabilidade reduzida de componentes poliméricos quando submetidos a solicitações cíclicas prolongadas. Esses aspectos indicam que, para aplicações em voo real, seriam desejáveis materiais com maior resistência à fadiga, tolerâncias construtivas mais restritas e soluções híbridas envolvendo materiais compósitos e metálicos.

Também, no que se refere à integração de células solares, a versão 1.0 do protótipo se mostrou promissora. Entretanto, torna-se necessário considerar aprimoramentos estruturais mais robustos para suportar adequadamente a incorporação das células fotovoltaicas, bem como as solicitações dinâmicas associadas às oscilações do sistema.

Dessa forma, considerando o caráter investigativo do presente trabalho, os resultados obtidos foram considerados suficientes para a conclusão deste trabalho. Cabe a pesquisas futuras o desenvolvimento de uma versão 2.0 do protótipo, com refinamentos estruturais, aerodinâmicos e elétricos, conforme discutido na seção de sugestões para trabalhos futuros.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho investigou, de forma integrada, os efeitos da cinemática de batimento de asas na geração de potência elétrica por células solares embarcadas em VANTs bioinspirados. Motivada por uma lacuna identificada na literatura, a pesquisa combinou modelagem computacional, simulações numéricas e validação experimental em bancada, com o objetivo de compreender como a orientação angular variável das superfícies fotovoltaicas influencia a eficiência da conversão energética em regimes oscilatórios.

Do ponto de vista teórico, foi desenvolvido um modelo computacional baseado na teoria de vigas de Euler-Bernoulli e no método dos Elementos Finitos, capaz de reconstruir a geometria defletida da asa ao longo do ciclo de batimento. A partir dessa reconstrução, implementou-se uma modelagem vetorial da incidência solar, considerando explicitamente o produto escalar entre o vetor normal da superfície e o vetor solar incidente. Essa abordagem permitiu avaliar, de maneira contínua no tempo, a irradiância efetiva projetada sobre blocos de células fotovoltaicas distribuídas ao longo da asa, fornecendo uma representação mais realista das condições de operação em VANTs de asas batentes.

Os resultados numéricos evidenciaram que a variação angular imposta pelo batimento provoca flutuações periódicas na irradiância incidente e, consequentemente, na potência elétrica gerada. Observou-se que a magnitude dessas flutuações depende da amplitude e da frequência de oscilação, bem como da configuração geométrica adotada para a distribuição das células solares. Em regimes específicos, a oscilação pode intensificar perdas associadas a ângulos de incidência desfavoráveis, destacando a importância de considerar explicitamente a cinemática da asa na estimativa da geração fotovoltaica embarcada.

Complementarmente, foi desenvolvida e instrumentada uma bancada experimental capaz de reproduzir, de forma razoavelmente controlada, o movimento oscilatório de uma asa equipada com células solares comerciais. A campanha experimental permitiu comparar diretamente a geração de potência elétrica em dois regimes distintos: estacionário, no qual a célula permanece fixa e orientada de forma ideal em relação ao sol, e oscilatório, representativo da condição de voo estacionário de um VANT bioinspirado. A repetição sistemática dos ensaios e o tratamento estatístico dos dados conferiram robustez às análises realizadas.

Os resultados experimentais corroboraram as tendências observadas nas simulações computacionais, indicando que o regime oscilatório resulta, de modo geral, em uma redução da potência elétrica média gerada quando comparado ao regime estacionário. Além disso, a análise temporal revelou um aumento significativo da variação da potência no caso oscilatório, associado às mudanças contínuas de orientação da célula solar durante o movimento. A utilização de médias móveis e bandas de desvio padrão permitiu caracterizar essa variação de forma quantitativa, evidenciando o impacto da dinâmica oscilatória sobre a estabilidade da geração elétrica, apesar das limitações imposta pelo sistema de aquisição de dados empregado.

A análise conjunta das variáveis ambientais medidas durante os ensaios (irradiância solar, temperatura da célula, temperatura ambiente e umidade relativa do ar) indicou que, nas condições experimentais adotadas, tais variáveis permaneceram relativamente estáveis ao longo do tempo. Isso reforça a interpretação de que as diferenças observadas entre os regimes estacionário e oscilatório estão predominantemente associadas à cinemática imposta à célula solar, e não a flutuações ambientais significativas durante os testes.

Como principal contribuição científica, este trabalho demonstra, de forma teórica e experimental, que a cinemática de batimento de asas exerce influência direta e mensurável sobre a geração fotovoltaica embarcada em VANTs bioinspirados. Ao integrar dinâmica estrutural, modelagem vetorial de incidência solar e ensaios experimentais, a pesquisa avança o estado da arte ao superar abordagens simplificadas baseadas em superfícies solares estáticas, oferecendo subsídios mais realistas para o projeto de aeronaves energeticamente autossuficientes.

Do ponto de vista tecnológico, os resultados obtidos fornecem diretrizes importantes para o posicionamento e a segmentação de células solares em asas batentes, bem como para o desenvolvimento de estratégias de controle e gerenciamento energético capazes de mitigar perdas associadas à variabilidade angular. Esses aspectos são particularmente relevantes para aplicações em missões de longa duração, nas quais a eficiência energética é um fator crítico para a viabilidade operacional.

Apesar das contribuições alcançadas, algumas limitações devem ser reconhecidas. Os ensaios experimentais foram realizados em bancada, sem a presença de escoamento aerodinâmico, o que restringe a avaliação de efeitos aeroelásticos e aerodinâmicos acoplados à geração fotovoltaica. Além disso, a análise concentrou-se em um conjunto específico de frequências e amplitudes de oscilação, bem como em uma configuração particular de célula solar, não abrangendo a totalidade do espaço de projeto possível. Também, a versão 1.0 do protótipo desenvolvido, para a estrutura do veículo, se mostrou com necessidades de evolução para um possível ensaio com as células embarcadas. Porém, por outro lado, esta dissertação tem potencial para contribuir para o avanço do conhecimento na interseção entre engenharia aeronáutica, sistemas bioinspirados e energias renováveis, reforçando a viabilidade e a relevância da integração de sistemas fotovoltaicos em plataformas aéreas de asas batentes. Neste sentido, entende-se que os resultados apresentados podem ser úteis para pesquisas futuras e para o desenvolvimento de VANTs cada vez mais eficientes, autônomos e sustentáveis.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse contexto, trabalhos futuros podem explorar a extensão do modelo para formulações aeroelásticas mais completas, incorporando efeitos aerodinâmicos não estacionários e acoplamentos fluido-estrutura. A realização de ensaios em túnel de vento ou em voo real representa um passo natural para validar os resultados em condições mais próximas da operação prática. Adicionalmente, investigações envolvendo diferentes tecnologias de células solares, estratégias

avanças de MPPT e algoritmos de controle adaptativo podem ampliar ainda mais o potencial de geração energética em VANTs bioinspirados. Ainda, tem-se que novos desenvolvimentos são necessários para se obter futuras versões do protótipo da estrutura do veículo completo, especialmente visando a integração com as células solares e demais instrumentação embarcada.

REFERÊNCIAS

- AALTO. **Zephyr sets world-record for longest continuous flight, flying 67 days in stratosphere**. 2025. <https://www.aaltohaps.com/zephyr-sets-world-record-for-longest-continuous-flight-flying-67-days-in-stratosphere/>. Acesso em: 18 de julho de 2025.
- AL-EZZI, A. S.; ANSARI, M. N. M. Photovoltaic Solar Cells: A Review. **Applied System Innovation**, v. 5, n. 4, 2022.
- AL-HADDAD, L.; UKASZEWICZ, A.; MAJDI, H.; HOLOVATYY, A.; JABER, A.; AL-KARKHI, M.; GIERNACKI, W. Energy Consumption and Efficiency Degradation Predictive Analysis in Unmanned Aerial Vehicle Batteries Using Deep Neural Networks. **Advances in Science and Technology Research Journal**, v. 19, p. 21–30, 04 2025.
- ALSAYID, B.; JALLAD, J. Modeling and Simulation of Photovoltaic cells. **International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS)**, v. 2, n. 6, p. 1327–1331, 2011.
- ALTSHULER, D. L.; BAHLMAN, J. W.; DAKIN, R.; GAEDE, A. H.; GOLLER, B.; LENTINK, D.; SEGRE, P. S.; SKANDALIS, D. A. The Biophysics of Bird Flight: Functional Relationships Integrate Aerodynamics, Morphology, Kinematics, Muscles, and Sensors. **Canadian Journal of Zoology**, v. 93, n. 12, p. 961–975, 2015.
- AMARAL, L. R. do; ZERBATO, C.; FREITAS, R. G. de; JÚNIOR, M. R. B.; SIMÕES, I. O. P. da S. UAV Applications in Agriculture 4.0. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 0, p. e20207748, 2020. ISSN 1806-6690.
- AUSTIN, R. **Unmanned Aircraft Systems: UAV Design, Development and Deployment**. [S.l.]: AIAA Education, 2010. 360 p.
- BAYIZ, Y.; CHENG, B. State-Space Aerodynamic Model Reveals High Force Control Authority and Predictability in Flapping Flight. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 18, p. 20210222, 2021.
- BENEDICT, M.; COLEMAN, D.; CHOPRA, I.; HRISHIKESHAVAN, V. Design, Development, and Flight-Testing of a Robotic Hummingbird. In: **American Helicopter Society 71st Annual Forum, Virginia Beach, VA**. [S.l.: s.n.], 2015.
- BRUCK, H. A.; GUPTA, S. K. A Retrospective of Project Robo Raven: Developing New Capabilities for Enhancing the Performance of Flapping Wing Aerial Vehicles. **Biomimetics**, v. 8, n. 485, p. 1–28, 2023.
- BUTCHER, J. C. **Numerical Methods for Ordinary Differential Equations**. Nova Iorque, EUA: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-470-72335-7.
- CHIN, D. D.; LENTINK, D. Flapping Wing Aerodynamics: From Insects to Vertebrates. **Journal of Experimental Biology**, v. 219, n. 7, p. 920–932, 2016.
- CHIN, D. D.; MATLOFF, L. Y.; STOWERS, A. K.; TUCCI, E. R.; LENTINK, D. Inspiration for Wing Design: How Forelimb Specialization Enables Active Flight in Modern Vertebrates. **Journal of The Royal Society Interface**, v. 14, n. 131, p. 20170240, 2017.

CHU, Y.; HO, C.; LEE, Y.; LI, B. Development of a Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicle for Extended Flight Endurance. **Drones**, v. 5, p. 44, 05 2021.

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E.; WITT, R. J. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4. ed. [S.l.]: Wiley, 2001. 736 p. ISBN 978-0-471-35605-9.

CROON, G. de; PERCIN, M.; REMES, B.; RUIJSINK, R.; WAGTER, C. D. **The DelFly: Design, Aerodynamics, and Artificial Intelligence of a Flapping Wing Robot**. [S.l.]: Springer, 2015.

DELAURIER, J. D. An Aerodynamic Model for Flapping-Wing Flight. **The Aeronautical Journal**, v. 97, n. 964, p. 125–130, 1993.

DHAFARI, L. S. A.; AFZAL, A.; ABRI, O. K. A.; KHAN, A. Solar-Powered UAVs: A Systematic Literature Review. In: **2nd International Conference on Unmanned Vehicle Systems – Oman (UVS)**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 1–8.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

EL-BASIT, W. A.; EL-MAKSOOD, A. M. A.; SOLIMAN, F. A. E.-M. S. Mathematical Model for Photovoltaic Cells. **Leonard Journal of Sciences**, v. 23, p. 13–28, 2013.

Escritório de Padronização da OTAN. **Guidance for the Training of Unmanned Aircraft Systems (UAS) Operators**. 3. ed. [S.l.]: NATO Standardization Agency, 2014.

EVRO, S.; WADE, C. R.; TOMOMEWO, O. S. Solar PV Technology Cost Dynamics and Challenges for US New Entrants. **American Journal of Energy Research**, Science and Education Publishing, v. 11, n. 1, p. 15–26, 2023. ISSN 2328-7330.

FLOREANO, D.; WOOD, R. J. Science, Technology and the Future of Small Autonomous Drones. **Nature**, v. 521, p. 460–466, 2015.

GERADIN, M.; RIXEN, D. **Mechanical Vibrations: Theory and Application to Structural Dynamics**. [S.l.]: Wiley, 2014. ISBN 9780470847862.

GERE, J.; GOODNO, B. **Mechanics of Materials**. [S.l.]: Cengage Learning, 2012. ISBN 9781285225784.

GERTLER, J. U.S. Unmanned Aerial Systems. In: _____. [S.l.]: CRS Report for Congress – Congressional Research Service, 2012. p. 45–110.

GREEN, M. **Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications**. University of New South Wales: Prentice-Hall, 1982. (Prentice-Hall Contemporary Comparative Politics Series). ISBN 9780138222703.

GREEN, M. A. Solar Cell Fill Factors: General Graph and Empirical Expressions. **Solid-State Electronics**, v. 24, n. 8, p. 788–789, 1981.

HAZIMEH, H.; PONOMAREVA, N.; MOL, P.; TAN, Z.; MAZUMDER, R. The Tree Ensemble Layer: Differentiability Meets Conditional Computation. **CoRR**, abs/2002.07772, 2020.

- HOLNESS, A.; BRUCK, H. A.; GUPTA, S. K. Flexible Energy Harvesting/Storage Structures for Flapping Wing Air Vehicles. In: **Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, Volume 7**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 35–45. ISBN 978-3-319-62831-8.
- HOLNESS, A. E.; SOLHEIM, H.; BRUCK, H. A.; GUPTA, S. K. A Design Framework for Realizing Multifunctional Wings for Flapping Wing Air Vehicles Using Solar Cells. **International Journal of Micro Air Vehicles**, v. 11, p. 1756829319836279, 2019.
- HUDISTEANU, S. V.; MATEESCU, T. D.; POPOVICI, C. G. Five Parameter Model of Photovoltaic Panel Implemented in MATLAB/Simulink. **Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi**, v. 3, p. 1–11, 2015.
- IONESCU, O.; CERNICA, I. V.; MANEA, E.; PURICA, M.; CORNELIU, P. C.; PAUN, C.; ALINA, P. Microtextured Photovoltaic Cells System for UAVs Autonomy Extension. In: **2021 International Semiconductor Conference (CAS)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 99–102.
- JENSEN, J. H.; DYRE, J. C.; HECKSHER, T. Universal Wing- and Fin-Beat Frequency Scaling. **PLOS ONE**, Public Library of Science, v. 19, n. 6, p. 1–11, 06 2024.
- JIN, H.; JIN, X.; ZHOU, Y.; GUO, P.; REN, J.; YAO, J.; ZHANG, S. A Survey of Energy Efficient Methods for UAV Communication. **Vehicular Communications**, v. 41, p. 100594, 2023. ISSN 2214-2096.
- JONES, K.; PLATZER, M. An Experimental and Numerical Investigation of Flapping-Wing Propulsion. **AIAA Paper**, v. 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting, n. 99-0995, 1999.
- KANG, C.-K.; AONO, H.; CESNIK, C. E. S.; SHYY, W. Effects of Flexibility on the Aerodynamic Performance of Flapping Wings. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 689, p. 32–74, 2011.
- KIM, Y.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A.; ITO, T.; SHAN, W.; YANG, Q. Experimental Investigation of Aerodynamic Vibrations of Solar Wing System. **Advances in Structural Engineering**, v. 21, n. 15, p. 2217–2226, 2018.
- KUMAR, R.; PADHEE, S. S.; SAMANTA, D. **Aerodynamic Performance and Flow Mechanism of 3D Flapping Wing Using Discrete Vortex Method**. 2023. <https://arxiv.org/abs/2309.14832>. Acesso em: 12 de janeiro de 2025.
- LENTINK, D.; DICKINSON, M. Rotational Accelerations Stabilize Leading Edge Vortices on Revolving Fly Wings. **Journal of Experimental Biology**, v. 212, n. 16, p. 2705–2719, 2009.
- LENTINK, D.; HASELSTEINER, A. F.; INGERSOLL, R. *In Vivo* Recording of Aerodynamic Force with an Aerodynamic Force Platform: From Drones to Birds. **Journal of The Royal Society Interface**, v. 12, n. 104, p. 20141283, 2015.
- LENTINK, D.; MÜLLER, U. K.; STAMHUIS, E. J.; KAT, R. de; GESTEL, W. van; VELDHUIS, L. L. M.; HENNINGSSON, P.; HEDENSTRÖM, A.; VIDELER, J. J.; LEEUWEN, J. L. van. How Swifts Control Their Glide Performance with Morphing Wings. **Nature**, v. 446, n. 7139, p. 1082–1085, 2007.
- LI, S.; FANG, Z.; VERMA, S. C.; WEI, J.; SAVKIN, A. V. Navigation and Deployment of Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicles for Civilian Applications: A Comprehensive Review. **Drones**, v. 8, n. 2, 2024. ISSN 2504-446X.

LILLER, J.; GOEL, R.; AZIZ, A.; HESTER, J.; NGUYEN, P. Development of a Battery Free, Solar Powered, and Energy Aware Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicle. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 6141, 2025.

LIMA, J. V. F.; GONÇALVES, P. H. S. A. **A Influência do Ângulo de Inclinação na Incidência de Radiação Solar em Paineis Fotovoltaicos**. Brasília, Brasil, 2018. 172 p.

LIU, H.; XU, X.; MENG, Y.; YU, D.; LIU, H.; SHI, K. A Research for the Influence of Tilt Angles of the Solar Panel on Photovoltaic Power Generation. In: **2018 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 95–100.

LORENZO, E. **Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems**. [S.l.]: PROGENSA, 1994.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. [S.l.]: Wiley, 2003.

MA, Z.; ZHU, X.; ZHOU, Z. Taxiing characteristic analysis and control for full-wing solar-powered unmanned aerial vehicle. **Journal of Northwestern Polytechnical University**, v. 37, n. 1, p. 7–12, 2019.

MAMUN, M.; ISLAM, M.; HASANUZZAMAN, M.; SELVARAJ, J. Effect of Tilt Angle on the Performance and Electrical Parameters of a PV Module: Comparative Indoor and Outdoor Experimental Investigation. **Energy and Built Environment**, v. 3, n. 3, p. 278–290, 2022. ISSN 2666-1233.

MANABENDRA, M. D.; SUDHAKAR, Y.; GADDE, S.; SHANMUGAM, D.; VENKATESAN, S. Bio-inspired Flapping Wing Aerodynamics: A Review. **Journal of the Indian Institute of Science**, v. 104, p. 181–203, 01 2024.

MARTINEZ-PONCE, J.; HERKENHOFF, B.; ABOELEZZ, A.; URBAN, C.; ARMANINI, S.; RAPHAEL, E.; HASSANALIAN, M. Studies on V-Formation and Echelon Flight Utilizing Flapping-Wing Drones. **Drones**, v. 8, n. 8, 2024. ISSN 2504-446X.

MAZAHARI, K.; EBRAHIMI, M. Experimental study on interaction of aerodynamics with flexible wings of flapping vehicles. **Experimental Mechanics**, v. 50, p. 63–74, 2010.

MAZHAR, F.; SHAH, S. I. A. On the Unsteady Aerodynamics and Design of Flapping Wing Vehicles. In: **2020 17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 110–121.

MEIROVITCH, L. **Fundamentals of Vibrations**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2001. (McGraw-Hill Higher Education). ISBN 9780070413450.

MENG, Y.; SU, J.; SONG, J.; CHEN, W.-H.; LAN, Y. Experimental Evaluation of UAV Spraying for Peach Trees of Different Shapes: Effects of Operational Parameters on Droplet Distribution. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105282, 2020. ISSN 0168-1699.

MESSINGER, R. A.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. 528 p.

MOHSAN, S. A. H.; KHAN, M. A.; NOOR, F.; ULLAH, I.; ALSHARIF, M. H. Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. **Drones**, v. 6, n. 6, 2022. ISSN 2504-446X.

MUELLER, T. J.; DELAURIER, J. D. Aerodynamics of Small Vehicles. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 35, p. 89–111, 2003.

MURALEEDHARAN, N.; COHEN, D. S.; ESTRELA, V. V.; HEMANTH, J. V.; SAOTOME, O. V.; NIKOLAKOPOULOS, G. V.; SABATINI, R. V.; WACKETT, L. V. Modelling and Simulation of UAV Systems. In: _____. **Imaging and Sensing for Unmanned Aircraft Systems. Volume 1: Control and Performance**. [S.l.]: IET - The Institution of Engineering and Technology, 2020. cap. 5, p. 101–121.

NGUYEN, X. H.; NGUYEN, M. P. Mathematical Modeling of Photovoltaic Cell/Module/Arrays with Tags in Matlab/Simulink. **Environmental Systems Research**, v. 4, n. 24, p. 1–13, 2015.

NOTH, A. **Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight**. Tese (Doutorado) — ETH Zürich, 2008.

NREL. **Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart**. 2025. <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2026.

OETTERSHAGEN, P. High-Fidelity Solar Power Income Modeling for Solar-Electric UAVs: Development and Flight Test Based Verification. **ETH Zürich**, abs/1703.07385, 2017.

PECIAK, M.; SKARKA, W.; MATEJA, K.; GUDE, M. Impact Analysis of Solar Cells on Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Fixed-Wing UAV. **Aerospace**, v. 10, n. 3, 2023. ISSN 2226-4310.

PEREZ-ROSADO, A.; BRUCK, H. A.; GUPTA, S. K. Integrating Solar Cells Into Flapping Wing Air Vehicles for Enhanced Flight Endurance. **Journal of Mechanisms and Robotics**, v. 8, n. 5, p. 051006, 2016.

PEREZ-ROSADO, A.; GEHLHAR, R. D.; NOLEN, S.; GUPTA, S. K.; BRUCK, H. A. Design, Fabrication, and Characterization of Multifunctional Wings to Harvest Solar Energy in Flapping Wing Air Vehicles. **Smart Material Structures**, v. 24, n. 065042, p. 15, 2015.

PETREUS, D.; FARCAS, C.; CIOCAN, I. Modelling and Simulation of Photovoltaic Cells. **Electronics and Telecommunications**, v. 49, n. 1, p. 42–47, 2008.

POLETTI, R.; SCHENA, L.; KOLOSZAR, L.; DEGROOTE, J.; MENDEZ, M. A. **Reinforcement Twinning for Hybrid Control of Flapping-Wing Drones**. 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2505.18201>. Acesso em: 21 de maio de 2025.

RESTREPO-CUESTAS, B. J.; DURANGO-FLORÉZ, M.; TREJOS-GRISALES, L. A.; RAMOS-PAJA, C. A. Analysis of Electrical Models for Photovoltaic Cells Under Uniform and Partial Shading Conditions. **Computation**, v. 10, p. 111, 2022.

SANE, S. P. The Aerodynamics of Insect Flight. **Journal of Experimental Biology**, v. 206, n. 23, p. 4191–4208, 2003.

SHAKHATREH, H.; SAWALMEH, A. H.; AL-FUQAHA, A.; DOU, Z.; ALMAITA, E.; KHALIL, I.; OTHMAN, N. S.; KHREISHAH, A.; GUIZANI, M. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. **IEEE Access**, v. 7, p. 48572–48634, 2019.

SHIAU, J.-K.; MA, D.-M.; YANG, P.-Y.; WANG, G.-F.; GONG, J. H. Design of a Solar Power Management System for an Experimental UAV. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 45, n. 4, p. 1350–1360, 2009.

SHOCKLEY, W. The Theory of P-N Junctions in Semiconductors and P-N Junction Transistors. **The Bell System Technical Journal**, v. 28, n. 3, p. 435–489, 1949.

SHYY, W.; AONO, H.; CHIMAKURTHI, S.; TRIZILA, P.; KANG, C.-K.; CESNIK, C.; LIU, H. Recent Progress in Flapping Wing Aerodynamics and Aeroelasticity. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 46, n. 7, p. 284–327, 2010. ISSN 0376-0421.

SHYY, W.; AONO, H.; KANG, C.-k.; LIU, H. **An Introduction to Flapping Wing Aerodynamics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013. (Cambridge Aerospace Series).

SILVA, R. C.; BUENO, D. D. On the Dynamics of Flexible Wings for Designing a Flapping-Wing UAV. **Drones**, v. 8, n. 56, 2024.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations. **Solar Energy**, v. 83, n. 5, p. 614–624, 2009.

SORNEK, K.; AUGUSTYN-NADZIEJA, J.; ROSIKO, I.; OPUSIEWICZ, R.; OPUSIEWICZ, M. Status and Development Prospects of Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicles – A Literature Review. **Energies**, v. 18, n. 8, 2025. ISSN 1996-1073.

SOTO, W. D.; KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A. Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance. **Solar Energy**, v. 80, n. 1, p. 78–88, 2006.

SRI, K. R. B.; ANEESH, P.; BHANU, K.; NATARAJAN, M. Design Analysis of Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicle. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 8, n. 4, p. 397–407, 2016. ISSN 2175-9146.

SRIGRAROM, S.; CHAN, W.-L. Ornithopter Type Flapping Wings for Autonomous Micro Air Vehicles. **Aerospace**, v. 2, n. 2, p. 235–278, 2015. ISSN 2226-4310.

TAPIA, R.; SATUE, A. C.; NEKOO, S. R.; DIOS, J. R. M. de; OLLERO, A. **Experimental Energy Consumption Analysis of a Flapping-Wing Robot**. 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2306.00848>. Acesso em: 24 de junho de 2024.

The World Bank Group. **Global Solar Atlas**. 2018. <https://globalsolaratlas.info/map>. Acesso em: 16 de dezembro de 2024.

TIAN, Z.; ZYGMUNT, H.; SHINDE, S. Routing in Solar-Powered UAV Delivery System. **Drones**, v. 6, p. 282, 2022.

TIMOSHENKO, S. P. **History of Strength of Materials: With a Brief Account of the History of Theory of Elasticity and Theory of Structures**. [S.l.]: Dover Publications, 1983. (Dover Civil and Mechanical Engineering Series). ISBN 9780486611877.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009.

WANG, X.; WANG, H.; ZHANG, H.; WANG, M.; WANG, L.; CUI, K.; LU, C.; DING, Y. A Mini Review on UAV Mission Planning. **Journal of Industrial and Management Optimization**, v. 19, n. 5, p. 3362–3382, 2023. ISSN 1547-5816.

ZHANG, W.; HU, C. Solar Cell as Wings of Different Sizes for Flapping-Wing Micro Air Vehicles. **International Journal of Micro Air Vehicles**, v. 8, n. 4, p. 209–220, 2016.