

Análise da Contribuição da Geração de Energia Fotovoltaica na Autonomia Energética de um VANT Convertível *

Henrique S. de Sá* Leandro B. Becker** Guilherme V. Raffo***

* Undergraduate Program of Aerospace Engineering, Federal University of Minas Gerais, MG, (e-mail: henriquesas@ufmg.br).

** Department of Automation and Systems, Federal University of Santa Catarina, MG (e-mail: leandro.becker@ufsc.br)

*** Department of Electronic Engineering, Federal University of Minas Gerais, (e-mail: raffo@ufmg.br)

Abstract: This work proposes a methodology to estimate the electric power generation by a photovoltaic array of an autonomous convertible Unmanned Aerial Vehicle (UAV), along a known flight path. The methodology evaluates the integral of a vector field through the UAV surface to estimate the power generated by the cells of the photovoltaic array, in each instant of the flight. The models and calculations were performed in the *software* MATLAB, where were performed simulations of the photovoltaic power generation in the UAV. From an analysis of the power generation by the photovoltaic array and the energy consumption of the other power systems of the aircraft, results were obtained about the increase of the UAV's energy autonomy due to the absorption of solar energy during the flight.

Resumo: Este trabalho propõe uma metodologia para estimar a geração de energia elétrica pelo arranjo fotovoltaico de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) convertível autônomo, ao longo de uma trajetória de voo conhecida. A metodologia avalia a integral de um campo vetorial através da superfície do VANT para estimar a potência gerada pelas células do arranjo fotovoltaico, em cada momento do voo. Os modelos e cálculos foram implementados no *software* MATLAB, onde foram realizadas simulações da geração de energia fotovoltaica no VANT. Por meio da análise da geração de energia pelo arranjo fotovoltaico e do consumo dos demais sistemas de potência da aeronave, obtiveram-se resultados acerca do aumento da autonomia energética do VANT devido à absorção de energia solar ao longo do voo.

Keywords: Solar energy; convertible UAV; Energy autonomy ; Solar cells; Vector calculus.

Palavras-chaves: Energia solar; VANT convertível; Autonomia energética; Células solares; Cálculo vetorial .

1. INTRODUÇÃO

O planejamento de uma missão envolvendo um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANTs), como por exemplo do tipo busca e resgate, é diretamente dependente da autonomia energética da aeronave, uma vez que o tempo de voo e raio de operação desta aeronave são limitados pela sua energia disponível. Tipicamente, para se obter uma maior autonomia nos VANTs, costuma-se transportar mais energia em armazenadores, o que exige, no entanto, maior volume da estrutura e reduz a sua capacidade de transporte de carga útil. Assim, a busca por alternativas para se aumentar

a autonomia vem há muito tempo motivando diversas pesquisas acerca da implementação de energias renováveis na matriz energética das aeronaves (Bosso et al., 2016; de Carvalho Bertoli et al., 2015). *Sunrise I*, da empresa *Astro Flight*, foi a primeira aeronave não tripulada a voar usando somente energia solar (Zhu et al., 2014). O voo aconteceu no estado da Califórnia (EUA), em novembro de 1974, durando 20 minutos, a uma altitude de 100 metros. O VANT pesava 12,25 kg, tinha envergadura de 9,76 metros. *Sunrise II*, o modelo seguinte da aeronave, teve seu peso reduzido em 13% e a energia solar captada aumentada em 33% (Zhu et al., 2014). Outros modelos de aeronave seguiram com o desenvolvimento da tecnologia das células fotovoltaicas. Um dos marcos do desenvolvimento de aeronaves movidas a energia solar foi o voo intercontinental partindo da Suíça para Marrocos, da aeronave HB-SIA, da companhia *Solar Impulse SA*, que contava com arranjo solar de 12000 células e um carregamento de baterias de lítio de 400 kg. Voos contínuos podem ser realizados com projetos adequados da aeronave e seu sistema de captação de energia solar, conforme demonstrado em Oettershagen

* Este trabalho foi em parte financiado pelo INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) sob a concessão do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) nº 465755/2014-3, FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), nº 2014/50851-0. Este trabalho foi também em parte financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), códigos de finança nºs 88887.136349/2017-00 e 001, CNPq, (concessão nºs 311063/2017-9, 313568/2017-0 e 426392/2016-7), e FAPEMIG, concessão nº APQ-03090-17.

et al. (2015) através do projeto e validação da aeronave *AtlantikSolar*, que mantém o recorde de 81 horas de voo contínuo para um VANT de menos de 50 kg, sobrevoando 2338 km à uma altitude de 580 m. Para altitudes maiores, efeitos climáticos e da atmosfera apresentam menos obstrução ao efeito da radiação solar nos arranjos fotovoltaicos das aeronaves, de modo que aeronaves utilizadas como satélites de grande altitude são totalmente alimentadas com células solares e podem voar continuamente por 5 anos (Ackerman, 2013).

Na literatura não foram encontrados, até a presente data, dados de VANTs do tipo VTOL-CP (do inglês, *Vertical Take-off and Landing - Convertible Plane*) que utilizem células fotovoltaicas como fonte alternativa de energia. Neste âmbito, o projeto ProVANT-Emergentia, uma colaboração das Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade de Sevilha, na Espanha, desenvolve a aeronave ProVANT-Emergentia, um VANT convertível que tem energia fotovoltaica como fonte auxiliar de energia, com o propósito de aumentar a sua autonomia de voo. A aeronave em desenvolvimento é do tipo *Tiltrotor-VTOL* (*vertical take-off and landing*), cujo objetivo é realizar missões de busca e resgate. A mesma é capaz e operar em modo helicóptero e de executar voos de cruzeiro, como avião, conforme a angulação de seus propulsores. A aeronave tem como fonte energética principal um banco de baterias, possuindo como fonte de energia complementar um arranjo fotovoltaico composto de 22 células solares, conforme ilustrado na Figura 1. Para que o arranjo fotovoltaico fosse adaptado à geometria do VANT, foram escolhidas células solares flexíveis, modelo C60, do fabricante Sunpower (SUNPOWER, 2010).

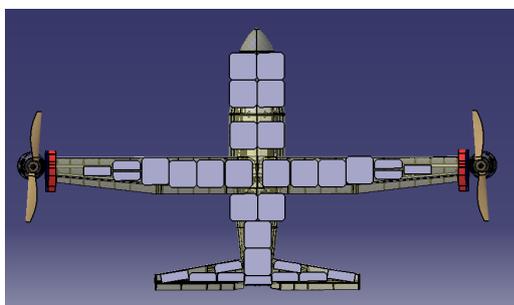


Figura 1. Disposição das células fotovoltaicas sobre o VANT em desenvolvimento.

A busca por aumentar a autonomia da aeronave ProVANT-Emergentia motivou pesquisas anteriores relacionadas à utilização da energia solar. No trabalho de da Silva (2017) foi proposto o projeto de inserção do arranjo fotovoltaico na aeronave em questão, porém para um modelo de diferente escala. Realizou-se a implementação de um sistema de alta relação entre massa e potência, fundamental para a autonomia da aeronave, além do projeto de um sistema de gerenciamento de energia (*EMS - Energy Management System*), o qual permite que a energia auxiliar fotovoltaica seja adicionada ao barramento de alimentação dos propulsores. Através dos dados de consumo energético obtidos por simulações do projeto aeronáutico (da Silva, 2017), investigou-se o impacto da inserção da energia fotovoltaica na autonomia do VANT. Para tal, foi utilizado um protó-

tipo plano da aeronave, fixo no solo. No entanto, para o caso de aeronaves que possuem arranjos fotovoltaicos localizados em suas asas, o encapsulamento das células com o objetivo de atingir o formato da aeronave pode deteriorar a eficiência das células (Benbouzid, 2019), de modo que a influência de tal fenômeno deve ser investigada.

O presente trabalho apresenta uma extensão da pesquisa apresentada em da Silva (2017), visando detalhar o impacto de se usar tal arranjo fotovoltaico no aumento da autonomia da aeronave ProVANT-Emergentia. A captação da energia solar por um painel fotovoltaico é diretamente dependente do ângulo de incidência dos raios solares nas células que o compõe. Quanto mais próximo a luz incidente for da direção perpendicular, maior a potência gerada pela célula (Sayigh, 1977). Deste modo, a análise da contribuição da energia solar do VANT é expandida para um arranjo fotovoltaico modelado com geometria de mesmo formato da superfície superior do VANT ProVANT-Emergentia, ao invés de um modelo plano e fixo ao solo como o utilizado em da Silva (2017). Assim, realizou-se uma análise sobre o impacto da consideração da geometria e da orientação da aeronave na potência gerada pelo arranjo fotovoltaico. O sistema proposto é modelado e implementado na ferramenta MATLAB, onde é calculada a obtenção da potência pelo arranjo fotovoltaico da aeronave ProVANT-Emergentia ao longo de uma determinada trajetória de voo.

As partes restantes deste artigo estão organizadas da seguinte forma: a Seção 2 apresenta conceitos preliminares necessários para os cálculos propostos para a obtenção da potência na aeronave. A Seção 3 detalha a modelagem do problema, descrevendo os passos para possibilitar a aplicação da formulação apresentada na Seção 2 e a obtenção da potência no arranjo fotovoltaico. Os resultados dos cálculos feitos com o auxílio do MATLAB são apresentados na Seção 4. Por fim, a Seção 5 apresenta as principais conclusões e discussão geradas a partir do presente trabalho.

2. CONCEITOS PRELIMINARES

Uma maneira de abordar o problema das diferentes orientações que raios solares podem incidir sobre as células solares com geometria não convencional, aqui delimitada pela superfície do VANT, é adotando uma análise através do cálculo vetorial. Mais especificamente, o caso da integral de um campo vetorial sobre uma superfície qualquer.

Seja S a superfície de uma parte qualquer do VANT onde estão alocadas células solares, pertencente à região $D \subset \mathbb{R}^2$, e de unidade dada em metros quadrados. A superfície é submersa em um campo vetorial de função $F(x, y, z)$, proveniente da radiação solar, de irradiância dada em Watts por metro quadrado.

Para o caso da luz incidindo sobre a célula solar, interessa apenas a ação da componente da luz que incide na direção normal à superfície da célula, \mathbf{n} , enquanto a luz incidindo paralelamente não produzirá potência. Assim, a situação pode ser analisada pela integral do campo vetorial F na direção normal à superfície, definida pela integral de superfície dada por

$$\iint_S F(x, y, z) \cdot \mathbf{n} \, dS. \quad (1)$$

Para a superfície S parametrizada por $z = g(x, y)$, $(x, y) \in D$, \mathbf{n} é obtido avaliando-se o gradiente da função da superfície, uma vez que este é sempre normal a ela. Assim, o vetor normal unitário é dado por

$$\mathbf{n} = \frac{\left(-\frac{dg}{dx}, -\frac{dg}{dy}, 1\right)}{\sqrt{\left(\frac{dg}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dg}{dy}\right)^2 + 1}}, \quad (2)$$

e aplicando a Equação (2) na Equação (1), tem-se

$$\iint_D F(x, y, g(x, y)) \cdot \left(-\frac{dg}{dx}(x, y), -\frac{dg}{dy}(x, y), 1\right) dx dy. \quad (3)$$

A Equação (3) resulta na potência incidida sobre as células fotovoltaicas, dada em Watts. A Equação será usada para a realização do cálculo da potência gerada pelo painel fotovoltaico do VANT, conforme descrito a seguir.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho visa a aplicação da teoria da integral de superfície de uma função vetorial sobre uma superfície. Isso é feito ao longo de uma trajetória predefinida do VANT para fins de estimativa da potência gerada pelo arranjo fotovoltaico no trajeto. Para tal, a geometria do VANT e a radiação solar incidida sobre ele são modelados matematicamente. Para a geometria do VANT, associam-se funções que caracterizam sua superfície em diferentes partes da aeronave. Já a luz solar é associada ao campo vetorial na qual o VANT é submetido. Calcula-se, então, a integral do campo vetorial sobre a superfície superior do VANT, onde está alocado o arranjo fotovoltaico. O resultado é associado à potência capaz de ser gerada pelas células solares. Assim, detalha-se este processo.

3.1 Modelagem da radiação solar como campo vetorial

A potência gerada por um arranjo fotovoltaico depende diretamente da angulação da luz solar incidida e da irradiância local (Honsberg and Bowden, 2019), de modo que a função do campo vetorial, que modela a luz solar local, é baseada nestes dois fatores da radiação solar.

A angulação dos raios solares em relação ao solo depende da posição do Sol no céu. Para a localização da posição do Sol, o sistema de coordenadas horizontal é considerado. No sistema horizontal, o observador está no centro da esfera celeste, e a posição do astro é definida por seu ângulo de azimute (α), partindo do eixo norte a 0° , e o ângulo proveniente de sua altura no céu (δ), que varia de 0° no horizonte, até 90° no eixo de zênite (de Castro Milone et al., 2018).

O sistema, plotado em coordenadas esféricas, pode ser passado a coordenadas cartesianas para a definição da orientação do campo vetorial em função das coordenadas x, y, z . As coordenadas referentes ao vetor definido por (α, δ, r) no sistema cartesiano, são calculadas por

$$x = r \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(90 - \alpha), \quad (4)$$

$$y = r \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(90 - \alpha), \quad (5)$$

$$z = r \cdot \sin(\delta), \quad (6)$$

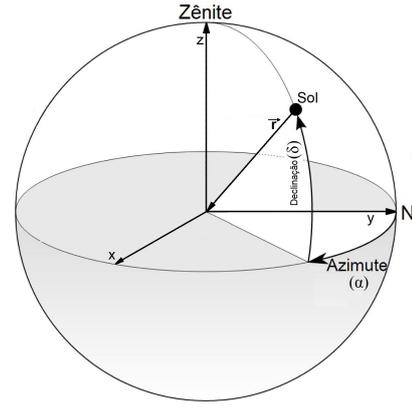


Figura 2. Sistema de coordenadas horizontal.

com r sendo um vetor unitário que liga o ponto de coordenadas esféricas dadas por $(\alpha, \delta, 1)$. A Figura 2 ilustra a posição do sol nos sistemas de coordenadas horizontal e em coordenadas esféricas.

As componentes x, y, z do vetor que liga o ponto (α, δ, r) à origem são calculadas através das Equações (4) - (6): equação (4) para a direção i , equação (5) para a direção j e equação (6) na direção k . Deste modo, o vetor associado ao plano cartesiano equivale a um vetor unitário com direção ditada pelas equações em questão.

Para a modelagem do campo vetorial, assume-se raios solares que atingem a aeronave são paralelos entre si. A aproximação da direção paralela em si dos raios solares para o sistema é razoável e simulações computacionais considerando tal aproximação são capazes de trazer resultados realísticos (M. Mussard, 2013). Deste modo, o campo vetorial é tomado por múltiplos vetores de mesma direção e sentido, sendo calculados no espaço R^3 conforme as Equações (4) - (6).

O comprimento dos vetores que caracterizam o campo vetorial, isto é, o módulo dos vetores, é baseado na irradiância local, ou seja, a potência fornecida pela radiação solar por metro quadrado. Para a definição do comprimento dos vetores, no entanto, algumas outras hipóteses devem ser tomadas. Embora a irradiância varie com a altitude (M. B. Lumthaler, 1996), a altitude de operação do VANT é relativamente pequena, o que resulta em pouca variação na irradiância local devido à mudança de altitude. Devido à esta condição, neste trabalho, a variação da irradiância com a altitude é desconsiderada e considera-se apenas o valor obtido para a irradiância local em solo. Além disso, uma vez que o raio de operação do VANT é relativamente pequeno, na ordem de poucos quilômetros, as variações de latitude e longitude também causam pequeno impacto na variação da irradiância local. Portanto, o módulo dos vetores que caracterizam o campo vetorial é tomado como constante para todo o espaço tridimensional, e equivalem à uma multiplicação do vetor unitário r pelo valor da irradiância em solo. A Figura 3 exibe o campo vetorial modelado referente ao solo, definido com base nas características da radiação solar local.

O campo modelado referente ao solo, no entanto, não é necessariamente o campo vetorial visto pela aeronave. Conforme ilustrado em Cardoso (2021) para a aeronave ProVANT-EMERGENTIA, o ângulos de arfagem (θ), gui-

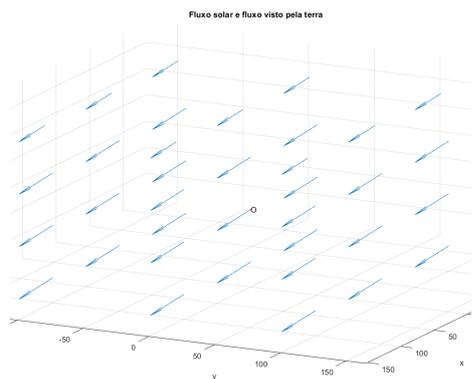


Figura 3. Campo vetorial gerado pela radiação solar.

nada (ψ) e rolamento(ϕ), definem a orientação do VANT. A depender desta orientação, a direção dos raios solares que incidem sobre as suas células é alterada. Deste modo o campo vetorial deve ser rotacionado de modo a representar aquele que realmente define a incidência solar sobre a superfície do VANT. Para tal, podem ser usadas as seguintes matrizes de rotação:

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ 0 & \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix},$$

$$R_y(\psi) = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & 0 & \text{sen}(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{pmatrix},$$

$$R_z(\phi) = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & -\text{sen}(\phi) & 0 \\ \text{sen}(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

O campo vetorial após as rotações, $F(x, y, z)$, é utilizado para estimar a potência da aeronave.

3.2 Modelagem da superfície do VANT

O projeto da geometria do VANT é baseado em fatores como sua eficiência estrutural, desempenho, aerodinâmica e facilidade de manufatura, sendo portanto uma geometria não convencional para um arranjo fotovoltaico localizado em sua superfície superior, de modo que requer uma análise sobre o formato do arranjo.

Desenhos técnicos da aeronave foram utilizados para que fosse possível levantar funções, $g(x, y)$, que correspondessem às superfícies de formato aproximado de sua geometria real. Analisou-se o perfil de cada seção do VANT onde são alocadas as células solares, tal como suas asas, fuselagem frontal, central e traseira e a empenagem. Através da atribuição de pontos na parte superior da superfície, funções de superfície foram obtidas por meio de interpolação. Como exemplo do processo, a Figura 4 mostra o perfil do aerofólio do VANT, que define a geometria das asas e, conseqüentemente, das células fotovoltaicas aportadas sobre ela. A parte superior da curva de perfil foi discretizada e as funções de superfície levantadas através da regressão polinomial dos pontos traçados. Duas diferentes curvas foram usadas para aproximar a geometria do aerofólio, conforme exibido na Figura 5. De maneira semelhante, levantou-se as curvas para as demais seções da aeronave.

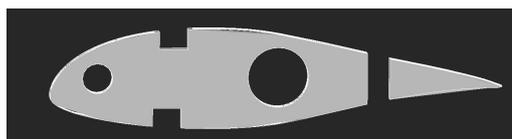


Figura 4. Desenho técnico em CAD do perfil da asa do VANT.

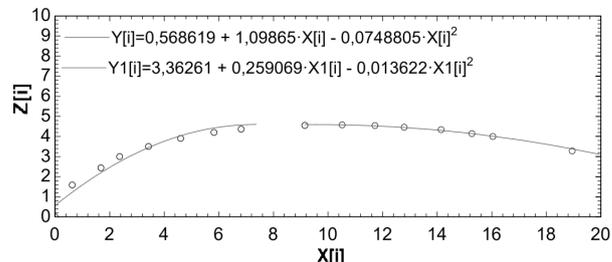


Figura 5. Perfil da asa modelado como funções matemáticas explícitas.

As funções 2D de perfil levantadas foram expandidas para um espaço tridimensional com o auxílio do MATLAB, respeitando a demais geometrias de projeto da aeronave, como mostrado nas Figuras 6 e 7. As células solares são modeladas definindo o domínio das funções de superfícies $g(x, y)$ no plano xy , conforme as dimensões reais das células solares selecionadas para o projeto (SUNPOWER, 2010), em metro quadrado.

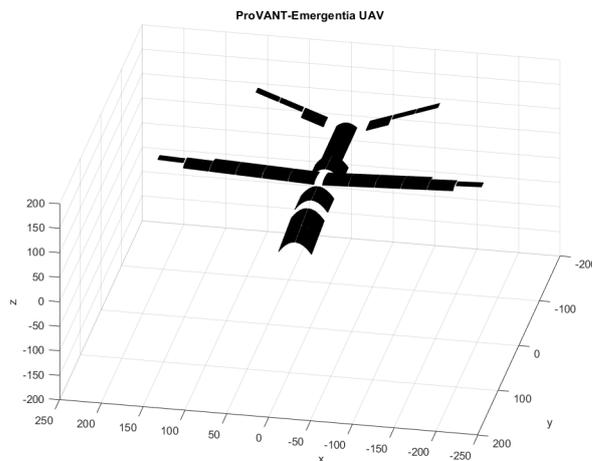


Figura 6. Vista 3D das funções de superfície que definem a geometria do VANT no MATLAB.

3.3 Cálculo da integral de superfície do campo vetorial sobre as células do VANT

Uma vez modeladas as funções do campo vetorial, $F(x, y, z)$, correspondentes à radiação solar incidente no VANT, e a função $g(x, y)$, que define as superfícies superiores da aeronave onde estão alocadas as células fotovoltaicas, é possível realizar a integral do campo vetorial pela superfície. Com isso, estima-se a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico em determinado momento pela aplicação da Equação (3). Para situações onde há luz solar incidindo por toda a célula, o domínio D corresponde à região de cada célula projetada no plano xy . A Figura 8 mostra o

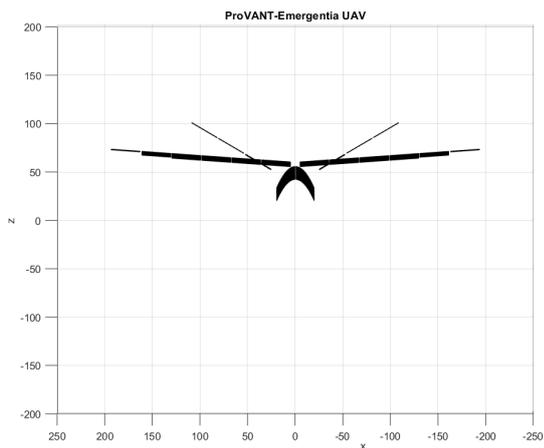


Figura 7. Vista frontal das funções de superfície que definem a geometria do VANT no MATLAB.

arranjo fotovoltaico do VANT submetido ao campo vetorial modelado.

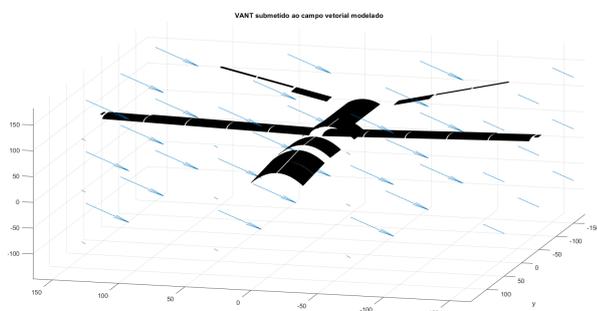


Figura 8. Arranjo fotovoltaico do VANT submetido ao campo vetorial modelado.

O domínio D para o qual a Equação (3) deve ser aplicada para fins do cálculo da integral sobre cada célula pode variar conforme a incidência solar. Em alguns casos, a depender da orientação da aeronave, parte da superfície de uma célula solar não está sob incidência de raios solares, estando numa situação de sombra. É o caso onde, matematicamente, o fluxo do campo vetorial modelado estaria apontando para fora da superfície. O VANT, no entanto, é uma superfície sólida e a realização da integral sobre as células solares deve ser feita apenas para as áreas da superfície das células onde o campo vetorial aponta no sentido de adentrar a superfície, de modo que a Região D de integração deve ser a projeção apenas destas áreas, onde a luz incide. A determinação da Região D , que define os limites de integração da Equação (3), pode ser feita encontrando o ponto onde o campo vetorial é tangente à superfície do VANT. Isto acontece nos pontos onde o produto escalar entre o vetor normal à superfície, \mathbf{n} , e os vetores do campo vetorial é nulo, de modo que os limites de integração em x e y podem ser encontrados analisando a localização de tais pontos nos planos xz e yz , respectivamente. A Figura 9 mostra a região de integração para a fuselagem central do VANT submetida a uma situação de sombra, com os raios solares incidindo na superfície à 45° no plano xz , assim como a reta de tangência que limita a região D .

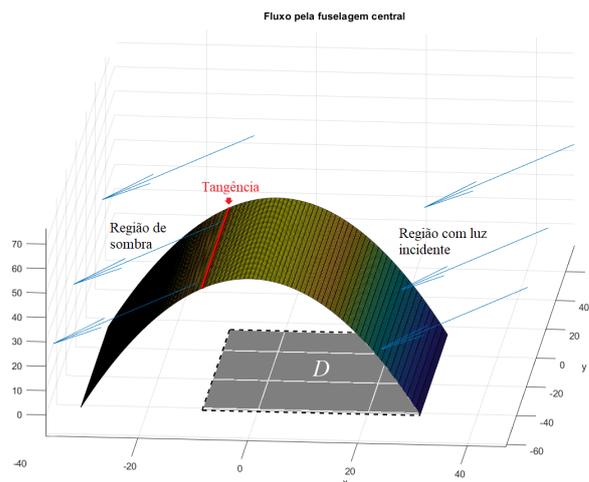


Figura 9. Região de integração para a luz incidente à 45° sobre a fuselagem central do VANT.

Deste modo, a integral do campo vetorial sobre a superfície do VANT é determinada conforme a condição da incidência solar sobre este. Uma vez realizada a integral do campo vetorial por todas as funções que definem as superfícies das células solares, torna-se possível estimar a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico do VANT num dado momento. Além dos cálculos das integrais sobre as superfícies das células solares, o resultado tem de ser multiplicado pela eficiência da célula solar para a obtenção do valor final da potência.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados resultados de simulações realizadas com o auxílio do MATLAB para a estimativa da capacidade de geração de energia fotovoltaica pelo arranjo de células do VANT ao longo de uma trajetória conhecida. Ademais, estima-se a contribuição da energia gerada para o aumento da autonomia do VANT, junto aos demais sistemas de potência da aeronave.

4.1 Capacidade de geração do arranjo fotovoltaico

Uma vez modeladas as funções das superfícies que definem as células solares e o campo vetorial em função da angulação e radiação solar, calculou-se as integrais de superfície para a obtenção da potência gerada pelo arranjo fotovoltaico do VANT. Na Tabela 1 são apresentados estes resultados para diferentes ângulos de incidência solar. Para a definição do campo vetorial, assume-se uma irradiância de 1000 W/m^2 .

Os resultados mostram que a máxima potência gerada pelo arranjo fotovoltaico do VANT, contendo 22 células solares, para a irradiância adotada, é de aproximadamente 63,5 Watts. Isto ocorre nas situações onde os ângulos α e δ são iguais à 90° , ou seja, quando os raios incidem na direção do eixo Z da aeronave. De acordo com o *datasheet* do modelo da célula adotada (SUNPOWER, 2010), para um mesmo arranjo de 22 células, porém com geometria de um painel plano, ao invés da geometria do VANT, seriam gerados um máximo de aproximadamente 75,4 Watts, para a situação onde os raios solares incidem perpendicularmente ao painel.

Tabela 1. Potência (W) gerada pelo arranjo fotovoltaico para diferentes ângulos de incidência.

δ	α						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0°	0.5	1.29	3.14	4.96	6,45	7.52	8,1
15°	1.09	5.29	8.50	11.41	14.22	15.46	15.9
30°	3.1	10.77	18.68	23.57	27.39	30.14	31.22
45°	4.87	18.71	26.29	33.27	38.79	42.89	44.41
60°	6,4	22.86	32.13	40.73	47.57	52.71	54.58
75°	7.5	25,46	35,8	45,43	53,14	58,95	61,03
90°	8,01	26,2	37,02	47,03	55,1	61,2	63,5

Além da obtenção da potência total gerada no arranjo fotovoltaico, o cálculo das integrais do campo vetorial nas superfícies permite estimar a potência gerada pelas diferentes partes do VANT. Na Tabela 2, mostra-se os resultados para uma angulação solar de $\alpha = 45^\circ$ e $\delta = 90^\circ$, situação ilustrada na Figura 8, para uma irradiância solar de 1000 W/m^2 .

Tabela 2. Potência gerada nas diferentes partes do VANT.

Módulos	Potencia (W)
Fuselagem frontal	7,07
Fuselagem central	3,60
Fuselagem traseira	8,22
Asa esquerda	12,08
Asa direita	10,5
Empenagem esquerda	4,38
Empenagem direita	1,17
Potência total do arranjo	47,03

Através da Tabela 2, observa-se que, de fato, os módulos que tiveram maior incidência de raios nas células solares foram os que mais contribuíram para a geração da potência total.

4.2 Potência gerada em trajetória de voo predefinida

Considerando o fato de que a aeronave em análise é autônoma, simulações contendo os cálculos da integral do campo vetorial sobre a superfície do VANT podem ser feitos para uma trajetória de voo predefinida. Isso é possível pois se sabe de antemão a orientação da aeronave ao longo da trajetória e, com isso, é possível a obtenção da potência total gerada pelo arranjo fotovoltaico da aeronave no percurso. A Figura 10 apresenta uma trajetória de voo previamente definida para a aeronave, apresentada em Cardoso (2021), a qual será utilizada nesta análise.

Define-se, primeiramente o campo vetorial ao qual o VANT estará submetido, conforme a metodologia proposta na Seção 3.1. Isto depende do local e das condições meteorológicas, bem como o horário e o dia em que o voo acontecerá, o que definirá a posição do Sol no céu e a sua irradiância. Baseado nas informações apresentadas no *datasheet* do fabricante das células fotovoltaicas (SUNPOWER, 2010), considera-se uma irradiância local hipotética também de 1000 W/m^2 . Define-se a posição do Sol no céu na direção de zênite, onde os raios solares incidem perpendicularmente ao solo, situação que representa um voo realizado próximo do meio-dia.

Conforme descrito na Seção 3, a direção do campo vetorial incidente na superfície da aeronave também é afetada

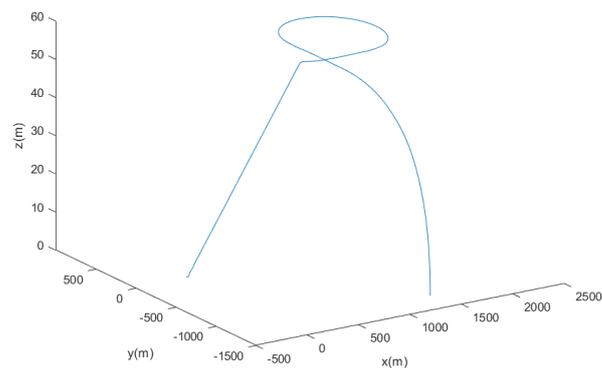


Figura 10. Trajetória de voo predefinida da aeronave ProVANT-Emergentia.

pela orientação do VANT. Para a trajetória ensaiada, a orientação da aeronave é mostrada na Figura 11. Através das superfícies do VANT traçadas no MATLAB, a integral do campo vetorial da superfície do VANT foi calculada ao longo de toda a trajetória, resultando na potência obtida pelo arranjo fotovoltaico para cada momento. A Figura 12 mostra o valor da potência gerada ao longo dos 250 segundos do voo completo da aeronave pela trajetória definida, incluindo as situações de decolagem, voo de cruzeiro e aterrissagem.

Nota-se que há pouca oscilação na potência gerada pelo arranjo fotovoltaico, permanecendo em torno do valor máximo esperado para a situação, 63,5 Watts. As oscilações que ocorrem na potência gerada se devem à variação da orientação da aeronave ao longo da trajetória, especialmente estes não sofrem grandes variações ao longo do percurso. Salienta-se que, devido à posição do Sol ter sido definida na direção de zênite, a variação no ângulo de guinada gera pouca influência na variação da potência gerada.

Estimou-se também, para esta mesma trajetória, o aumento da autonomia do VANT com a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico. Na Figura 13, apresenta-se o diagrama de blocos para a integração do sistema elétrico da aeronave com o sistema de captação de energia fotovoltaica, visando estimar o estado de carga das baterias durante o voo. Dentre os grupos que compõe o sistema elétrico estão o banco de baterias, o arranjo fotovoltaico, o grupo propulsor, composto pelos dois motores principais da aeronave, e a eletrônica embarcada. O banco de baterias foi simulado utilizando o modelo de baterias Lítio-ion disponível no *Simulink*, de mesmas características das baterias selecionadas no projeto da aeronave. Uma adaptação do modelo do arranjo fotovoltaico real foi feita para fins da simulação. O projeto real do arranjo fotovoltaico para o VANT conta com um circuito de transformação da energia obtida para a recarga do banco de baterias (da Silva, 2017), por meio de um conversor CC-CC, com o controle feito por um algoritmo MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracker*). Tais circuitos foram simulados através de uma fonte de corrente contínua, acoplada diretamente ao banco de baterias, para realizar a recarga. O valor da corrente

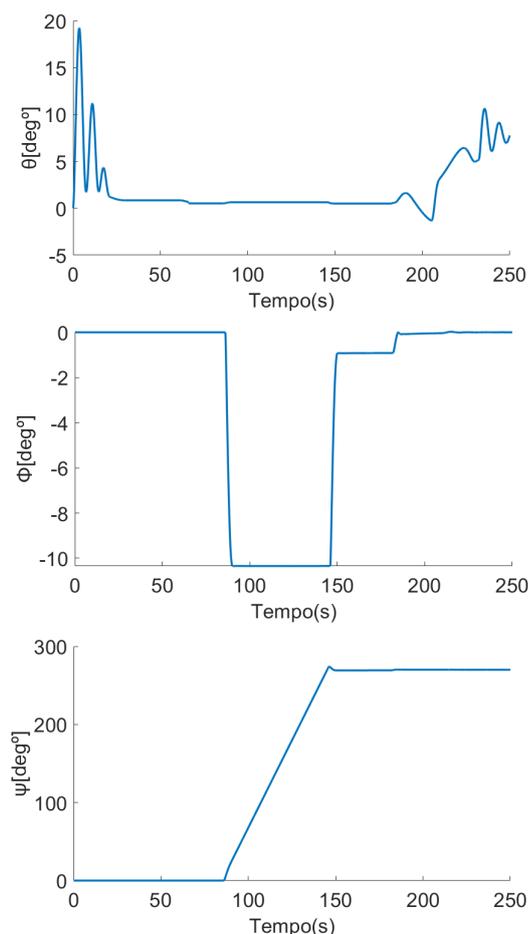


Figura 11. Variação dos ângulos de arfagem, guinada e rolamento do VANT ao longo da trajetória de voo testada.

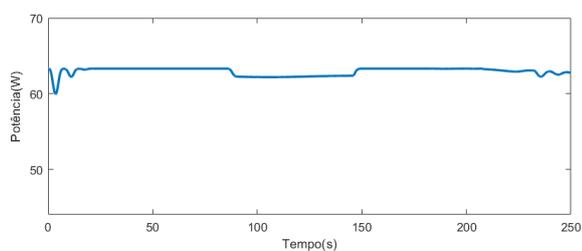


Figura 12. Potência gerada pelo arranjo fotovoltaico ao longo da trajetória de voo.

forneada é função da razão potência gerada pelo arranjo fotovoltaico, explicitada para esta trajetória na Figura 12, pela tensão nominal do circuito do arranjo fotovoltaico da aeronave. O valor da corrente que chega às baterias é dividido por um fator, resultante da conversão da tensão do painel fotovoltaico, que é elevada até a tensão do banco de baterias do VANT. O sistema modelado permite simular idealmente a transmissão da energia do arranjo fotovoltaico para o banco de baterias. O modelo do sistema propulsivo da aeronave que representa o comportamento dos motores da aeronave foi apresentado em Cardoso (2021), e foi utilizado para obtenção da potência requerida pelo grupo propulsor, em função da força requerida pelos motores em cada instante da trajetória analisada. A força

exigida pelos motores ao longo da trajetória, por sua vez, também foi explorada, sendo obtida a partir de Cardoso (2021).

Já o consumo de potência pela eletrônica embarcada foi obtido previamente no projeto do ProVANT-Emergentia, analisando-se os *datasheets* de todos os componentes que compõe sua arquitetura e a demanda média de potência do sistema. Tanto os motores quanto a eletrônica embarcada são acoplados ao banco de baterias como fontes de corrente constante, de valor dado em função da potência requerida, porém com a corrente fluindo no sentido de descarregar as baterias.

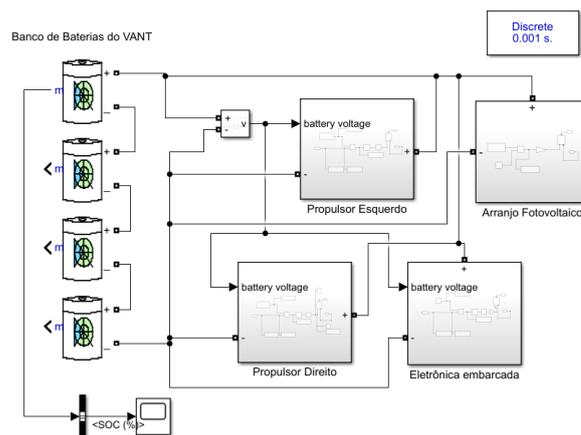


Figura 13. Diagrama do sistema elétrico da aeronave ProVANT-Emergentia no *Simulink*.

Para fins de estimativa do aumento da autonomia gerada pela captação da energia solar, os resultados foram obtidos com e sem a presença do arranjo fotovoltaico. A Figura 14 mostra a comparação entre o percentual do estado de carga (*SoC*, do inglês *State of Charge*) das baterias ao longo da trajetória, para as duas situações.

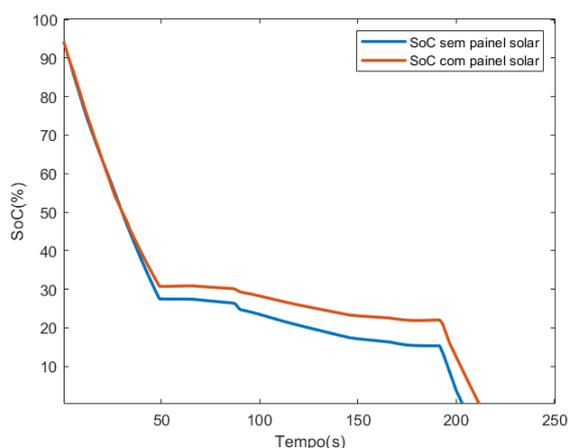


Figura 14. Estado de carga das baterias, com e sem o arranjo fotovoltaico.

O VANT *tiltrotor* decola e pousa em modo helicóptero, com os propulsores consumindo alta energia, mas em voo de cruzeiro passa a contar com a força de sustentação produzida por suas asas, demandando menor energia dos

propulsores, situação que ocorre aproximadamente entre 50 e 190 segundos. Observa-se que o banco de baterias, em ambas as situações, seria completamente descarregado antes do fim dos 250 segundos de voo. Ainda assim, o banco de baterias na situação em que recebe energia do arranjo fotovoltaico teve um aumento de aproximadamente 4% no tempo de voo.

Ainda que para a trajetória analisada o aumento da autonomia tenha sido apenas de poucos segundos, para trajetórias mais suaves e duradouras, onde consome-se menos energia nas situações de pouso e decolagem e tem-se um período maior em voo de cruzeiro, a energia captada pelo arranjo fotovoltaico da aeronave se torna mais relevante.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma solução para o cálculo da potência gerada por um arranjo fotovoltaico de geometria não convencional e sob diferentes orientações, o qual se encontra associado a um VANT. A metodologia e solução propostas se baseiam na aplicação da teoria de integrais de superfície. Embora nesse trabalho tal metodologia foi aplicada a um VANT, a mesma também pode ser aplicada em painéis solares de geometria qualquer e em diferentes situações de uso.

A solução proposta foi validada para uma trajetória específica da aeronave, onde foi calculado o aumento de sua autonomia através da integração do arranjo fotovoltaico com os demais circuitos elétricos e de potência do VANT, podendo ser estudado o impacto da geração solar na autonomia da aeronave.

Vale ressaltar que a solução proposta é ideal, ou seja, não considera diversos efeitos adversos que podem contribuir na geração real de energia elétrica pelas células solares, tais como nebulosidade, grau de poluição, temperatura, umidade, acúmulo de sujeira e perdas de energia nos circuitos. Além disso, simplificações foram feitas na modelagem, onde não foram considerados aspectos físicos do arranjo fotovoltaico, onde, por exemplo, o fato de uma região do arranjo de células solares receber sombra afeta a eficiência não apenas da parte sombreada, mas do arranjo como um todo. Contudo, os resultados apresentados nos cálculos da potência gerada pelo arranjo fotovoltaico da aeronave ProVANT-Emergentia são coerentes com os valores teóricos esperados segundo as especificações técnicas das células solares utilizadas e os experimentos realizados por da Silva (2017), para a potência esperada para o arranjo projetado.

Conclui-se, portanto, que a metodologia apresentada pode ser considerada efetiva para o estudo do impacto da geração da energia solar do VANT na sua autonomia de voo, sob diversas condições da radiação local. Através do seu uso é possível explorar diferentes trajetórias de voo, ou diferentes estratégias de controle, que otimizem a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico e, conseqüentemente, a autonomia da aeronave. Como trabalhos futuros, buscase a validação da metodologia proposta com experimentos reais usando o VANT ProVANT-Emergentia, bem como o desenvolvimento de um sistema geração de energia para o VANT que integre tanto o banco de baterias e células fotovoltaicas, quanto células de combustível de hidrogênio.

REFERÊNCIAS

- Ackerman, E. (2013). Giant solar-powered uavs are atmospheric satellites. URL <<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/drones/giant-solar-powered-uavs-are-atmospheric-satellites>>.
- Benbouzid, M.N.B.Z.Z.M. (2019). A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects. *Applied Energy*, 255, 113–123.
- Bosso, A., Conficoni, C., and Tilli, A. (2016). Multirotor uav flight endurance and control: the drive perspective. In *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1839–1845. IEEE.
- Cardoso, D.N. (2021). *Robust Control Framework in the Weighted Sololev Space*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), Brazil.
- da Silva, G.M. (2017). *Sistema de gerenciamento de energia fotovoltaica aplicado um veículo aéreo não-tripulado*. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), Brazil.
- de Carvalho Bertoli, G., Pacheco, G.M., and Adabo, G.J. (2015). Extending flight endurance of electric unmanned aerial vehicles through photovoltaic system integration. In *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 143–147. IEEE.
- de Castro Milone et. al., A. (2018). *Introdução à Astro-nomia e Astrofísica*. INPE, São José dos Campos(SP), Brazil.
- Honsberg, C. and Bowden, S. (2019). Solar Radiation on a Tilted Surface. URL <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-on-a-tilted-surface>.
- M. B. Lumthaler, W. Ambach, R.E. (1996). Increase in solar uv radiation with altitude. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 130-134, 39.
- M. Mussard, O.J.N. (2013). Influence of solar tracking inaccuracy and sun rays modeling on the efficiency of a small-scale parabolic trough. *Energy Procedia*, 1509-1515, 123–126.
- Oettershagen, P., Melzer, A., Mantel, T., Rudin, K., Lotz, R., Siebenmann, D., Leutenegger, S., Alexis, K., and Siegwart, R. (2015). A solar-powered hand-launchable uav for low-altitude multi-day continuous flight. In *IEEE ICRA*, 3986–3993. IEEE.
- Sayigh, A. (1977). *Solar Energy Engineering*. Academic Press, London.
- SUNPOWER (2010). C60 solar cell monocrystalline silicon. URL http://eshop.terms.eu/_data/s_3386/files/1379942540-sunpower_c60_bin_ghi.pdf.
- Zhu, X., Guo, Z., and Hou, Z. (2014). Solar-powered airplanes: A historical perspective and future challenges. *Progress in aerospace sciences*, 71, 36–53.