

DIMENSIONAMENTO E INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EM UM VEICULO AEREO NÃO TRIPULADO (VANT) DO TIPO MULTIROTOR PLANEJANDO SER ALIMENTADO SOMENTE POR ENERGIA SOLAR.

William Felipe Orjuela Velandia, felipeorjuelavelandia@gmail.com¹

Francisco Nivaldo Aguiar Freire, nivaldo@ufc.br¹

¹Universidade Federal do Ceara, Av. da Universidade, 2853 - Benfica, Fortaleza, CEP 60020-181

Resumo: Os problemas de poluição e a necessidade de conseguir uma menor dependência das fontes convencionais de energia, principalmente o petróleo, conduziram a que as energias renováveis passarem a ter um papel importante nos sistemas de propulsão. Por tão razão e dispondo dos benefícios das novas tecnologias no campo dos veículos aéreos não tripulados (VANT), neste trabalho é apresentado um estudo onde a energia solar é usada como fonte de energia num veículo aéreo não tripulado do tipo multirotor. Este documento destaca aspectos do desenho do sistema fotovoltaico, apoiado nas necessidades do sistema de propulsão, assim como o desenho da estrutura que suportara os motores. Finalmente os testes do painel solar a fim de observar a potência gerada, e a energia suficiente para alimentar o multicóptero são apresentados.

Palavras-chave: VANT, energia solar, célula solar fotovoltaica, energia renovável, sistemas fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

O rápido esgotamento das fontes convencionais de energia e a crescente procura por energias renováveis no contexto das questões ambientais têm motivado as pesquisas com novas centrais elétricas com tecnologia avançada e mais eficientes. Adicionalmente, as preocupações com a proteção ambiental estão aumentando no mundo todo. Consequentemente, tanto a nova energia (solar, eólica, hidroelétrica, etc.) quanto as tecnologias de combustível limpo estão sendo intensamente pesquisadas.

A maior parte das energias renováveis proveniente do vento, marés, geotérmica, biomassa e solar são convertidas em energia elétrica para ser entregue diretamente à rede elétrica ou cargas isoladas (Mercure e Salas, 2012) (Canale *et al*, 2009). Uma das tecnologias de maior importância, na área de energias renováveis, é a solar, que, por meio dos sistemas fotovoltaicos, produz energia elétrica sem prejudicar o meio ambiente. Desta forma, uma fonte livre inesgotável é convertida em eletricidade. Além disso, a diminuição contínua dos custos dos sistemas fotovoltaicos e o aumento da sua eficiência, sugerem um papel promissor para os sistemas de geração fotovoltaica no futuro (Zweibel, 2013; Singh, 2013 e Rapinett, 2009).

A energia obtida a partir do uso de radiação eletromagnética emitida pelo sol é muito importante em muitos setores, porque é limpa. No campo da aviação, ela é a chave para fatores como a redução da emissão de poluentes, do ruído e a dependência do petróleo como fonte não renovável. Unindo esses fatores, a busca de novas tecnologias e formas de propulsão abre uma alternativa para inclui-la como uma nova fonte para as aeronaves.

Tendo em conta o que foi relatado anteriormente e a necessidade de uma aeronave voar por períodos longos de tempo, torna-se indispensável, tanto no campo da aviação civil como nos veículos aéreos não tripulados (VANT), o uso de uma fonte alternativa de energia como sistema de propulsão que melhore os diferentes sistemas que compõem uma aeronave. Adicionalmente, os VANT estão sendo cada vez mais utilizados em nossa sociedade, tanto para aplicações civis como militares.

Segundo Vidales (2013), a autonomia de voo exigido neste tipo de aeronave (VANT) é de algumas horas, em aplicações tais como: controle das fronteiras, luta contra os incêndios florestais, trabalho militar, vigilância, inspeções de linhas de transmissão e distribuição de energia, filmagens de baixo custo e fotografia panorâmica para a indústria cinematográfica, eventos esportivos, monitoramento de culturas agrícolas, segurança pessoal, entre outros. No entanto, outras aplicações em elevadas altitudes, tais como plataformas de comunicação para dispositivos móveis, pesquisa e previsão do tempo, entre outros, exigem uma autonomia de voo num tempo maior, chegando a ser de dias, de semanas, de meses ou até mesmo de anos. A diferença entre os veículos aéreos não tripulados (VANT), em comparação com

aviões comerciais, jatos e helicópteros, é que não há nenhum piloto a bordo e geralmente o piloto controla o movimento da aeronave desde o chão através de um controle remoto (Agarwal *et al*, 2014).

Tendo em conta a grande classificação dos VANT, uma de estas classificações são os multirotores, os quais, dependendo do número de motores, apresentam designações diferentes, expostas na Tab. 1, e neste caso, durante o desenvolvimento da pesquisa, foi usado o tipo quadcoptero.

Os multirotores, segundo Sá *et al.*, (2012), são um tipo de helicóptero que estão equipados por três ou mais motores, e a principal característica destes é que as hélices adjacentes giram em direções opostas, não sendo necessário um rotor de cauda para contrabalançar o movimento angular da hélice. Adicionalmente, os multirotores também possuem um sistema dinâmico acoplado, com o qual ao mudar a velocidade dos motores muda-se também a posição do VANT.

Tabela 1: Classificação quanto ao número de motores.

Número de motores	3	4	5	6	8
Designação	tricóptero	quadcoptero	pentacóptero	hexacóptero	Octacóptero

Fonte: próprio do autor.

Do mesmo modo, ao se instalar um sistema fotovoltaico nos diferentes tipos de VANT, serão considerados aeronaves solares. Segundo Abbe e Smith (2016), podem ser descritos como veículos aéreos capazes de fazer voos dependendo apenas da radiação solar. Ademais, o desenho e o desenvolvimento destes veículos vêm ganhando um crescente nível de interesse nos últimos 30 anos. Adicionalmente, em todos os projetos de aeronaves solares desenvolvidos, torna-se importante conhecer a função das células solares ou células fotovoltaicas, que são dispositivos que convertem energia solar em elétrica por efeito fotovoltaico. Além de serem amplamente utilizadas em aplicações espaciais, permitindo uma fonte de energia limpa e de longa duração, que quase não exige manutenção, e possui uma ampla vida útil (Noth, 2008).

O princípio básico deste projeto é que as células solares recobrem uma determinada área da aeronave, geralmente na superfície superior, assim como é exposto na Fig. 1.

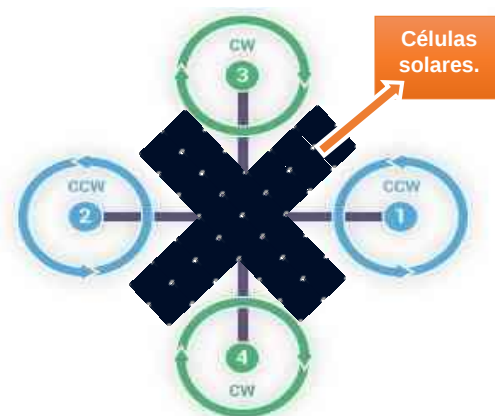


Figura 1: Multirotor com células solares

Fonte: Próprio do autor.

Toda melhoria tecnológica em qualquer subsistema tem um impacto global sobre a concepção da aeronave. Portanto, o desenvolvimento de qualquer tipo de energia renovável aplicável às aeronaves tem potencial para aperfeiçoar a eficiência e o desempenho delas em geral.

Aviões solares estão ganhando espaço, gradualmente, sobre aeronaves com combustível, em termos de compatibilidade tecnológica, ambiental e operacional. Os tecidos de elevada resistência, para minimizar o peso da estrutura exterior, os painéis solares de película fina, a bateria de combustível, as baterias como fontes de alimentação regenerativas e as unidades de propulsão leves, são tecnologias essenciais para a realização do voo contínuo. A combinação de sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia garantem o fornecimento de energia necessária para as operações das aeronaves de dia e de noite.

O desenho da aeronave e a quantidade de energia produzida dependem, segundo Cestino (2006) e Youngblood *et al.* (1984), de fatores ambientais e técnicos tais como: as estações do ano (devido à quantidade de luz solar que é exposta na superfície da terra); hora do dia (como um resultado do aumento da intensidade de luz solar do amanhecer até o meio-dia), a irradiação solar, a eficiência da célula solar fotovoltaica, a inclinação das células em relação ao sol e o nível de cobertura das nuvens, neste caso as células vão ficar sempre com a aeronave em movimento constante. Adicionalmente, segundo Betancourth *et al.* (2016), a superfície da célula solar é diretamente proporcional à quantidade

de energia elétrica fornecida. Por isso, é necessária uma área de arranjo fotovoltaico maior para a obtenção de melhores resultados de geração de energia. Finalmente, o objetivo principal deste projeto foi o de criar um sistema que permitisse utilizar a energia solar como uma fonte de energia limpa para ser incorporada em um veículo aéreo não tripulado (VANT), de tal forma que não seja necessário o uso de outras fontes de energia (baterias ou combustível).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Sistema Fotovoltaico do Multirotor.

A eficiência de conversão dos painéis fotovoltaicos depende diretamente do tipo de células fotovoltaicas a serem usadas. As células solares comercialmente disponíveis têm eficiências de conversão que variam entre 14 e 22% (Noth, 2008). As células do tipo silício monocristalino são historicamente as mais usadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade, além de serem mais eficientes na conversão do que as células de silício policristalino ou amorfas. Porém, as células monocristalinas são mais caras, e devido à sua estrutura tão delgada, são mais frágeis (Brito, 2008). As células solares de filme fino ou amorfo são mais leves e apresentam maior resistência à flexão, o que permite implementações fáceis em superfícies curvas, porém, possuem uma menor faixa de eficiência de conversão entre 6 e 14% (Vidales, 2013).

O dimensionamento dos requisitos de potência dos componentes eletrônicos é o responsável pelo desenho do painel solar a ser instalado no multirotor, que por sua vez permite o desenho da estrutura a ser usada. Esta seção apresenta o desenho do painel solar, o qual é um dos componentes mais pesados do multirotor.

O desenho atual do multirotor exigiu um painel solar que fosse capaz de produzir uma saída de aproximadamente 135 – 145 W com o fim de fornecer a energia suficiente para obter o impulso desejado pelo sistema de propulsão (motores) e fazer com que o multirotor decole.

As células solares monocristalinas foram escolhidas como a melhor opção de células solares disponíveis, pois apresentam a maior eficiência segundo Brito (2008). Na Figura 2, é apresentado pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis do Departamento de energia dos Estados Unidos, NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), os diferentes tipos de células solares desenvolvidas junto com sua eficiência de conversão.

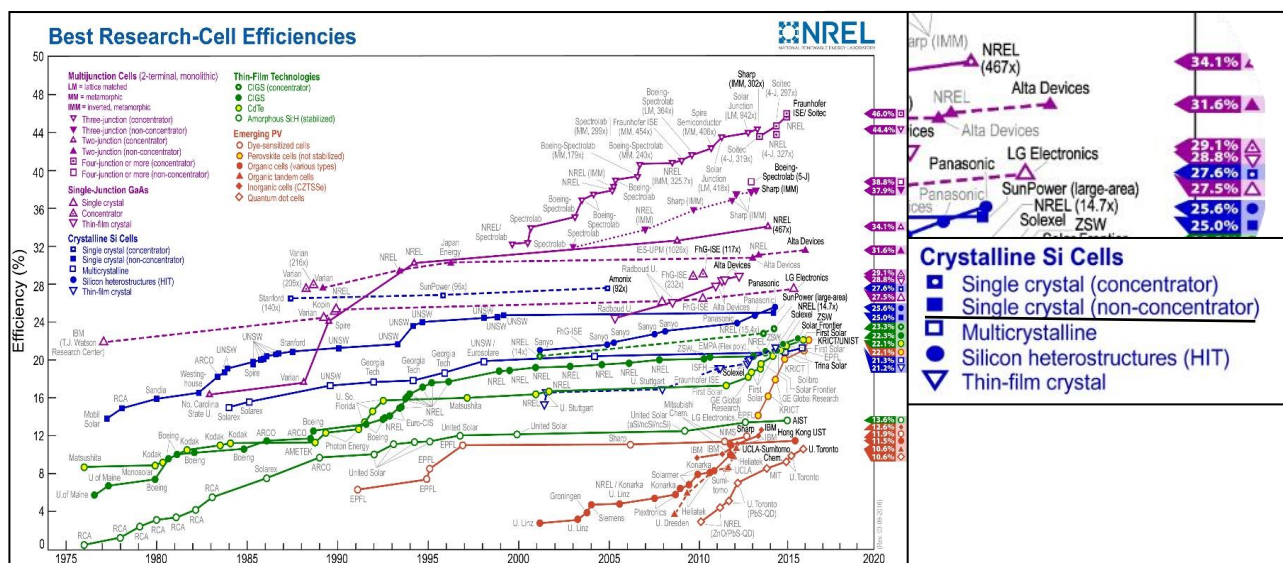


Figura 2: Melhores eficiências de células solares no mundo.

Fonte: (Solar, 2015)

O painel solar projetado tem um total de 48 células solares de 0,5 V e tensão de 6 A de corrente cada, apresentado na Fig. 3a, as quais foram distribuídas numa área total de 0,85m², exposto na Fig. 3b, gerando um total de 144 W e um peso de 450 gramas, proporcionando a energia necessária, além de gerar um excedente de energia para contrariar perdas.

Usualmente, na construção de painéis solares, as células monocristalinas requerem uma solução de encapsulamento leve que aumenta sua resistência física e sua proteção ao meio ambiente. Neste caso, o encapsulamento aumentaria significativamente o peso do painel solar no multirotor.

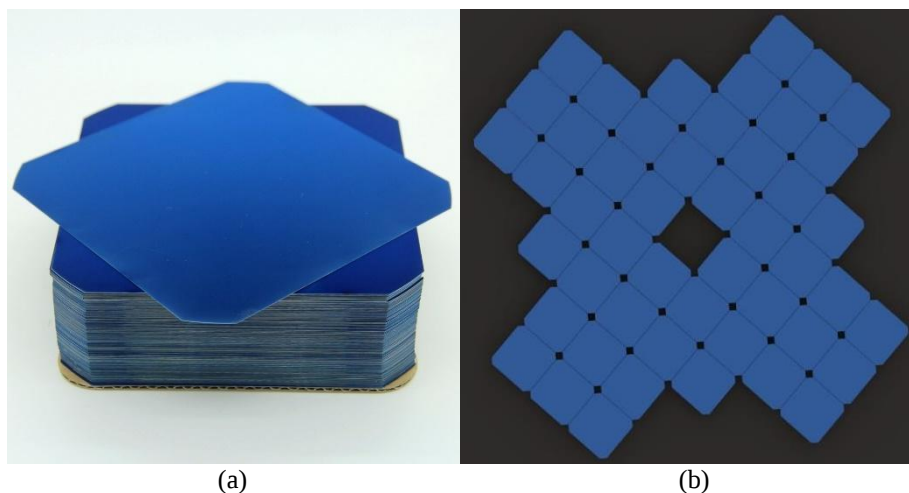


Figura 3: (a) Painel solar projetado; (b) Célula solar “maxeon c60” usada.

Fonte: Próprio do autor.

Portanto, foi projetado um painel solar que possuísse uma estrutura rígida e leve e que permitisse uma proteção direta (estrutura de proteção) contra os danos que possam ocorrer devido aos movimentos dos motores, bem como o possível ataque de pequenas pedras ou lixo que podem danificar as células solares. Por outro lado, era essencial, também, a fácil incorporação da estrutura dos painéis com a estrutura do multirotor.

O design projetado e implementado é um quadro feito de madeira balsa, com furos na posição de cada célula solar, a fim de aliviar a estrutura. A Figura 4 mostra o modelo final da estrutura suporte e de proteção.

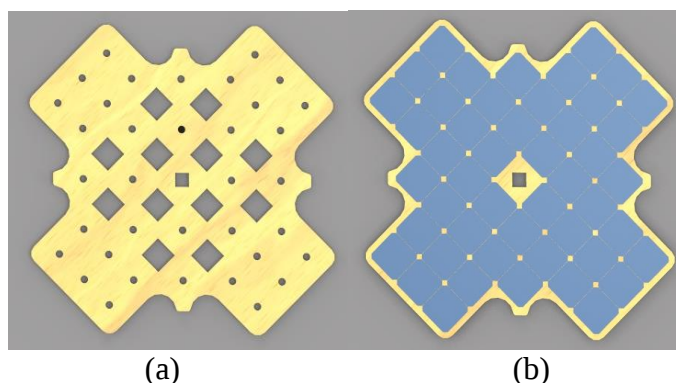


Figura 4: (a) Estrutura de madeira balsa; (b) Painel solar colado na estrutura de madeira.

Fonte: Próprio do autor.

2.2. Sistema de Propulsão

O sistema de propulsão, ou seja, os motores, foram escolhidos com base em um estudo de 4 diferentes tipos de motores brushless comercialmente disponíveis, os quais são usados na montagem de multirotores. O principal critério foi a tensão necessária para seu funcionamento e o consumo de corrente, assim como o impulso gerado no momento de consumo desta corrente.

Para este estudo, foram escolhidos quatro motores de diferentes kV (quilovolts), conforme a Tab. 2, junto com suas respectivas hélices com as quais apresentam melhor eficiência.

De acordo com a tensão necessária dos diferentes tipos de motores, foram escolhidos aqueles que usam 11,1 V ou menos, visto que para um motor que usa 14,8 V, precisaríamos de mais células solares, o que faria com que o painel solar ficasse com um maior tamanho e peso. Em seguida, o critério usado foi o consumo de corrente e o impulso gerado. Ao observar o impulso de 183 g gerado pelos 6.5 A consumidos pelo motor emax 1306, percebemos que, em comparação com os motores emax 2205 e 2213, não há impulso sequer para levantar o peso da base de suporte dos painéis solares, o que o leva a ser descartado.

Finalmente, em comparação aos valores apresentados pelos motores emax 2205 e 2213 mostrados na Fig. 5, pode-se observar que o impulso gerado pelo motor emax 2213 é maior e consome menor amperagem do que o 2205, e, por esta razão, foi escolhido o motor de 935 kV para o desenvolvimento do multirotor.

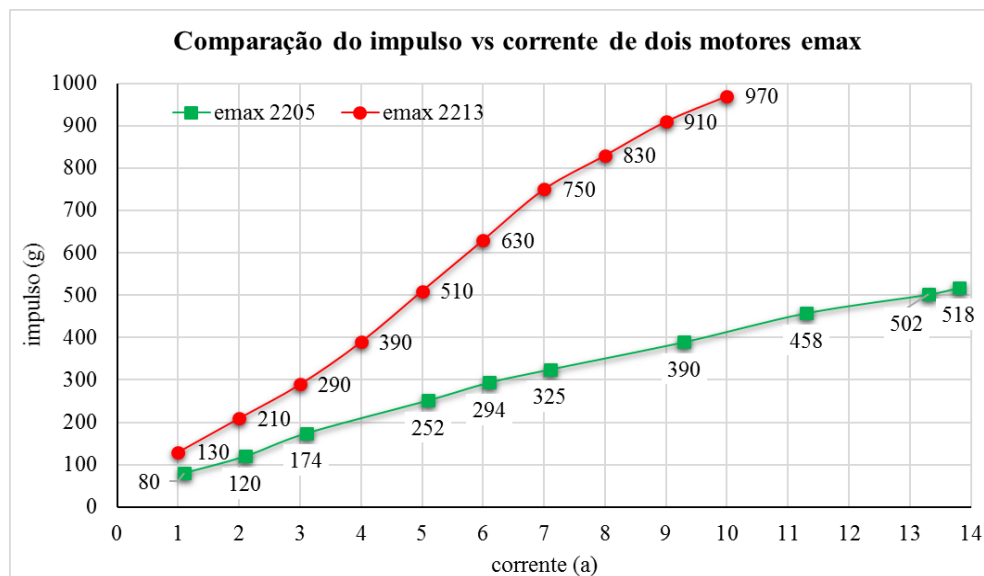


Figura 5: Comparação de dois motores.

Fonte: Próprio do autor.

Tabela 2: Características dos motores Brushless

motor	emax 1306		emax 2205		emax 2213		rctimer 5010	
Hélice	GF3040		HQ1045		10x5.5		17x5.5	
kV	3300		2300		935		360	
Tensão (V)	11,1		11,1		11,1		14,8	
poder	corrente (A)	impulso (g)	corrente (A)	impulso (g)	corrente (A)	impulso (g)	corrente (A)	impulso (g)
10%	0,7	30	1,1	80	1	130	1,8	400
20%	1	51	2,1	120	2	210	2	450
30%	2	89	3,1	174	3	290	3,2	610
40%	3	118	5,1	252	4	390	3,8	680
50%	4,1	135	6,1	294	5	510	4,2	740
60%	5,2	168	7,1	325	6	630	4,7	830
70%	5,7	171	9,3	390	7	750	5,3	910
80%	6,2	176	11,3	458	8	830	6,7	995
90%	6,3	180	13,3	502	9	910	8,1	1100
100%	6,5	183	13,8	518	9,1	970	8,5	1170

Fonte: Próprio do autor.

Neste multirrotor foi usada a placa de controle SP RACING F3 que totalizou nove gramas, junto com controladores de velocidade EMAX 20A. A massa total do sistema de propulsão, antena e receptor, cabeado, placa de controle e controladores de velocidade (ESC) foi de 450gramas.

2.3. Estrutura do Multicóptero

A estrutura do multicóptero mostrada na Fig. 6 foi projetada usando o programa de modelamento CAD *solid edge st9*, atendendo primeiramente ao tamanho da estrutura suporte do painel solar. A estrutura foi feita em impressão 3D em material PLA, o qual é um polímero biodegradável sintético, tendo alto desempenho mecânico quando comparado ao polipropileno e poliestireno (Franchetti e Marconato, 2006).

A estrutura foi feita com um suporte central na qual são parafusados os quatro braços correspondentes aos motores do multirrotor. Esses braços por sua vez são colados na estrutura suporte do painel solar com o fim de se obter maior resistência.

A massa total dos componentes pré-selecionados corresponde a 1350 gramas e o impulso total máximo dos sistemas de propulsão é de 1500 gramas.

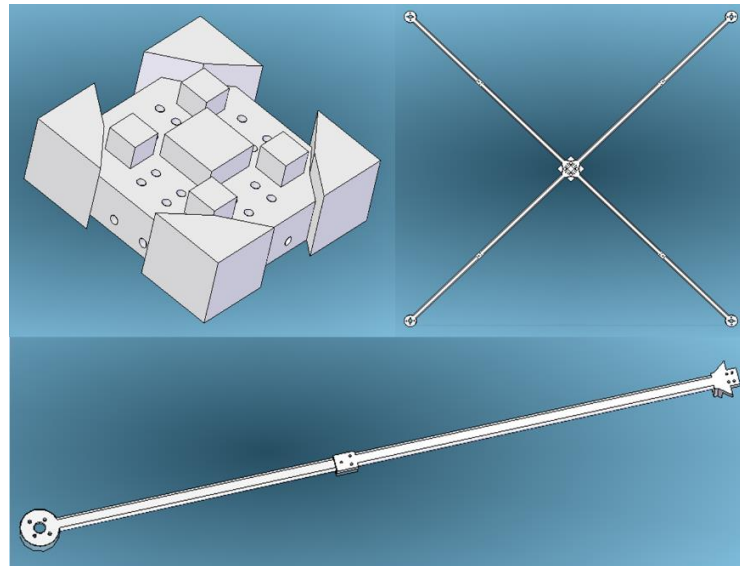


Figura 6: Estrutura do multicoptero

Fonte: própria do autor

O objetivo ideal do multirrotor é o de obter uma massa não maior do que a propulsão gerada pelo sistema. Por outro lado, a estrutura do multicoptero tinha que fornecer espaço suficiente para fixar o painel solar de $0,85\text{m}^2$, tendo em vista que quanto maior o diâmetro das hélices usadas mais longos serão os braços da estrutura.

2.4. Controle do Multicóptero

Com o fim de levar o multirrotor a voo, uma placa controladora de voo é usada, a qual contém giroscópios, bem como acelerômetros e outros sensores os quais geram sinais elétricos que são processados pela placa para controlar o multirrotor. Do mesmo modo, a placa controladora processa sinais de um receptor que está conectado a placa, que são enviados através de um transmissor pelo usuário.

A placa de controle, em seguida, extrai os dados necessários dos sensores e os processa com os sinais de entrada. Os sinais de saída são, então, gerados e enviados para os ESCs que, por sua vez, controlam a velocidade dos motores. Na Figura 7, é exposto o diagrama de sinais.

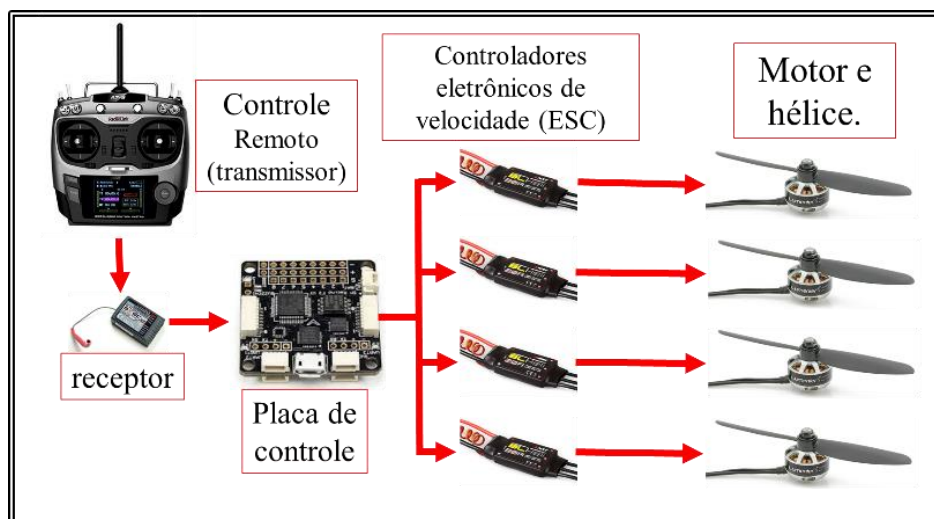


Figura 7: Diagrama de transmissão de sinais do controle remoto até os motores.

Fonte: Próprio do autor.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O arranjo fotovoltaico apresenta duas matrizes cada uma com 24 células ligadas em série, obtendo-se teoricamente por cada matriz 12 V e 6 A. Seguidamente as duas matrizes foram ligadas em paralelo, obtendo-se um total para o arranjo de 12 V e 12 A conforme a Fig. 3b, obtendo-se uma potência de 144W.

O arranjo fotovoltaico foi levado a campo aberto, com o propósito de observar seu comportamento ao ser irradiado diretamente pelo sol. A tensão fornecida foi de 14 V e a corrente foi de 11 A obtendo uma potência total de 154 W, o seja um 7% a mais do que o valor teórico. Do mesmo modo foi obtida o gráfico de tensão em circuito aberto visualizado na Fig. 8a, e o amperagem em curto circuito visualizado na Fig. 8b, com o fim de observar a mudança deles com respeito à radiação em certo intervalo de tempo.

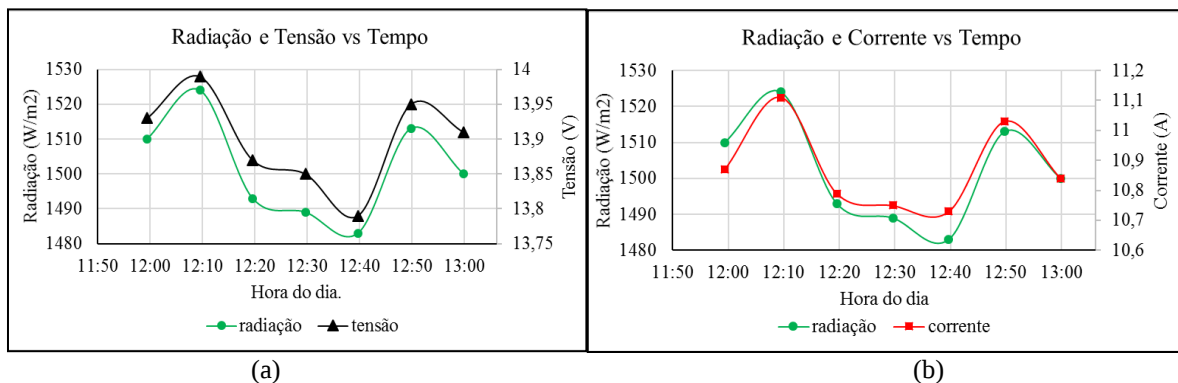


Figura 8: Diagrama de transmissão de sinais do controle remoto até os motores.

Fonte: Próprio do autor.

A tensão e a corrente foram medidas em intervalos de 10 em 10 minutos durante o período de 12:00 - 13:00 horas.

Posteriormente, os dados de radiação solar mostrados na Fig. 9, de um dia ensolarado na cidade de Fortaleza – Ceará, no local da Universidade Federal do Ceará foram observados, a fim de se obter o intervalo de tempo que corresponde ao de melhor índice de radiação solar. Obtidos esses valores, os testes do multirrotor serão no horário de tempo que apresento o melhor índice da radiação.

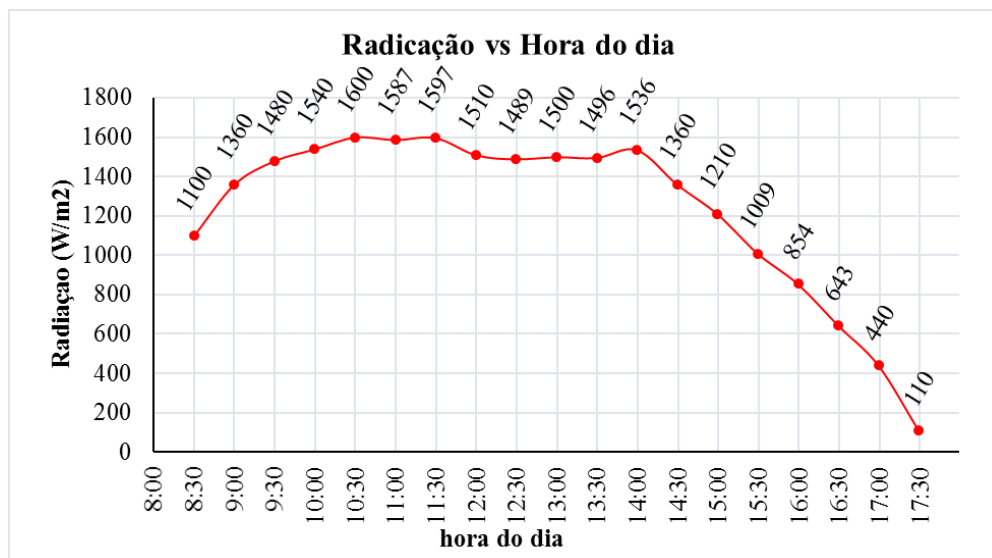


Figura 9: Quantidade de Radiação solar no dia 28 de novembro de 2017 durante as 8:00 – 17:30 horas.

Fonte: Próprio do autor.

De acordo com a Fig. 9 foi constatado que entre as 10:30 - 14:00 horas existe o intervalo de maior radiação com uma média de 1521,33 W/m².

Finalmente a aeronave foi levada no dia 29 de novembro de 2017 ao campo aberto a fim de fazer os de respetivos testes. Na Figura 10 o consumo de corrente e tensão ao mudar a potência dos motores é mostrado.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho mostram que o horário ideal para fazer os respetivos testes de voo, é durante o meio dia, onde o tempo de radiação fornecida é maior, tempo no qual é oferecida a energia necessária para o funcionamento do multirrotor, deste modo, logra-se evidenciar que é possível alimentar um VANT sem usar outras fontes de energia

(baterias ou combustível). Mas mesmo assim, atendendo a que o protótipo do multirrotor permaneceu em um peso de 1350 gramas, isso dificultou um pouco a decolagem do solo.

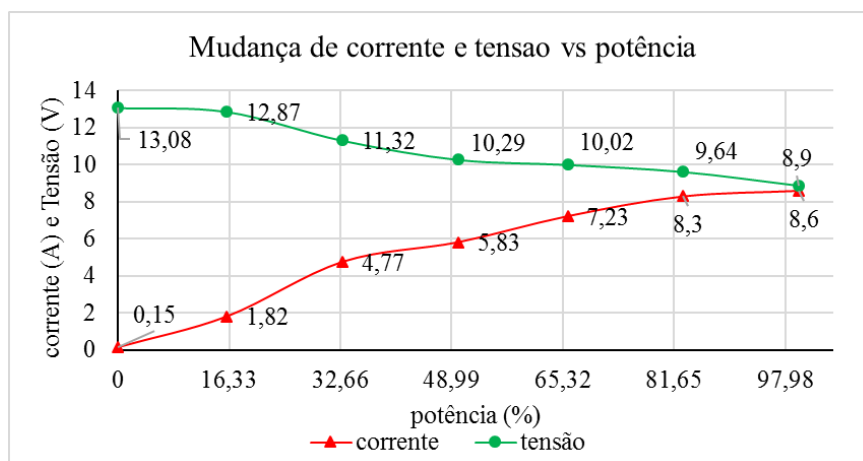


Figura 10: tensão e corrente consumida pelo sistema de propulsão do multicoptero

Fonte: Próprio do autor.

Com a finalidade de melhorar as condições do equipamento em trabalhos futuros com respeito a reduzir o peso, é necessário fazer um reajuste na estrutura suporte do painel fotovoltaico, a incorporação de um sistema de controle de velocidade ESC 4 em 1, bem como a inclusão de um material mais resistente e leve como fibra de carbono na estrutura que suporta os motores, além de considerar o atendimento ao sistema de navegação da aeronave, aspectos mais específicos como um melhor encapsulamento das células, estudos de transferência de calor e redução de arrasto.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela CAPES, Universidade Federal do Ceara, Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Filmes Finos e Energias Renováveis - UFC.

6. REFERÊNCIAS

- Abbe, G. and Smith, H., 2016, “Technological development trends in Solar-powered Aircraft Systems”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, pp. 770–783.
- Agarwal, S., Mohan, A., and Kumar, K., 2014, “Design, construction and structure analysis of twinrotor UAV”, *International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS)*, Vol. 4, No. 1, pp. 33.
- Betancourth, N. J. P., Villamarin, J. E. P., Rios, J. J. V., Bravo-Mosquera, P. D., and Cerón-Muñoz, H. D., 2016, “Design and Manufacture of a Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicle for Civilian Surveillance Missions”. *Journal of Aerospace Technology and Management*, Vol. 8, No. 4, pp. 385-396.
- Brito, S.D.S., 2008, “Centro de referência para energia solar e eólica”. *CRESESB Informe-Rio de Janeiro*, Vol. 12, No. 13, pp. 3.
- Canale, M., Fagiano, L., and Milanese, M., 2009, KiteGen: “A revolution in wind energy generation. *Energy*”, Vol. 34, No. 3, pp. 355-361.
- Cestino, E., 2006, “Design of solar high altitude long endurance aircraft for multi payload & operations”. *Aerospace science and technology*, Vol. 10, No. 6, pp. 541-550.
- Franchetti, S. M. M., and Marconato, J. C., 2006, “Polímeros biodegradáveis-uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos”. *Química Nova*, pp. 811-816.
- Mercure, J. and Salas, P., 2012, “An assesment of global energy resource economic potentials”. *Energy*, Vol. 46, No. 1, pp. 322-336.
- Noth, A., 2008, “Design of solar powered airplanes for continuous flight”, *Doctoral dissertation*, ETH Zurich.
- Rapinett, A., 2009, “Zephyr: a high altitude long endurance unmanned air vehicle”. *Doctor*, Department of Physics, University of Surrey.
- Sá, R. C., Barreto, G. A., de Araújo, A. L. C., and Varela, A. T., 2012, “Design and construction of a quadrotor-type unmanned aerial vehicle: Preliminary results”, *Engineering Applications (WEA), 2012 Workshop on. IEEE*, pp. 1-6.
- Singh, G. K., 2013, “Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review”, *Energy*, Vol. 53, pp. 1-13.
- Solar Energy Technologies office, *Energy Efficiency & Renewable Energy* 2005. Disponível em: <<https://energy.gov/eere/solar/downloads/research-cell-efficiency-records>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

Vidales, H. G., 2013 “Design, construction and test of the propulsion system of a solar uav”, MSc, Aerospace Engineering, Technical University of Lisbon, 2013.

Youngblood, J., Talay, T., and Pegg, R., 1984, “Design of Long-Endurance Unmanned Airplanes Incorporating Solar and Fuel Cell Propulsion”. In 20th Joint Propulsion Conference, pp. 1430.

Zweibel, K., 2013, Harnessing solar power: The photovoltaics challenge. Springer.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

DIMENSIONING AND INSTALLATION OF A SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN A UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) OF MULTIROTOR TYPE PLANNING TO BE POWERED ONLY BY SOLAR ENERGY.

William Felipe Orjuela Velandia, felipeorjuelavelandia@gmail.com¹

Francisco Nivaldo Aguiar Freire, nivaldo@ufc.br¹

¹Universidade Federal do Ceara, Av. da Universidade, 2853 - Benfica, Fortaleza

Abstract. *Pollution problems and the need to achieve a lower dependence on conventional sources of energy, especially oil, have led renewable energies to play an important role in propulsion systems. For this reason and with the new technologies benefits in the field of unmanned aerial vehicles (UAV), in this work a study where solar energy is used as an energy source in an unmanned aerial vehicle of the multirotor type is presented. This document highlights aspects of the photovoltaic system design, based on the needs of the propulsion system, as well as the structure design that would support the engines. Finally, the tests of the solar panel in order to observe the power generated, and the sufficient energy to feed the multicopter are presented.*

Keywords: UAV, solar energy, photovoltaic cell, renewable energy, photovoltaic systems.