

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO SCHMIDT DOS ANJOS

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO EM DRONES**

Porto Alegre

2016

GUSTAVO SCHMIDT DOS ANJOS

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO EM DRONES**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano

Porto Alegre

2016

GUSTAVO SCHMIDT DOS ANJOS

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO EM DRONES**

Este Projeto de Diplomação foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____
Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano, UFRGS

Regente da Disciplina: _____
Prof. Dra. Léia Bernardi Bagesteiro, UFRGS

Aprovado em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano, UFRGS
Doutor pela Universidade Politécnica de Madrid, Espanha

Prof. Dr. Hamilton Duarte Klimach, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Prof. Dr. Edison Pignaton de Freitas, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha namorada, pelo apoio e incentivo às realizações das atividades acadêmicas.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas da PixForce pelo auxílio com as atividades experimentais realizadas com o drone.

Ao departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de realização do curso de graduação.

À Ana Maria Gomes pela revisão ortográfica e formatação.

À Karine Ferreira Gomes pelas horas de compreensão e apoio a todas atividades relacionadas com este trabalho.

RESUMO

Buscando a melhor autonomia de voo para um veículo aéreo não tripulado (VANT), foi desenvolvido um projeto de captação de energia solar por células fotovoltaicas. Inicialmente foram analisadas diversas opções de células solares disponíveis comercialmente; após a escolha realizada, foram estudadas diferentes geometrias de aplicações das células sobre o VANT utilizado; ao associar 21 células em série, a tensão elétrica de operação resultante do painel formado foi de 12,05V. Foi escolhido um módulo conversor de potência CC-CC do tipo boost que melhor se adaptou às especificações do projeto. Realizadas as medidas em solo com o sistema fotogerador, foi possível comparar com dados de voos anteriores à aplicação; a potência média em voo fornecida apenas pelo conjunto de baterias do VANT foi de 113,08W; em testes de solo com apenas o sistema fotovoltaico aplicado, chegou-se à média de 26,52W de potência elétrica. Ao final, estimou-se um aumento de 27 minutos de autonomia, o que representa 35,7% em relação à 1 hora e 15 minutos referentes à autonomia anterior à aplicação do sistema proposto – mesmo utilizando apenas 41% da área disponível da aeronave, devido às limitações impostas pela geometria.

Palavras-chave: VANT. Drone. Célula fotovoltaica. Energia solar. PixForce.

ABSTRACT

A project of solar energy capture with the use of photovoltaic cells has been developed while looking for the best flight autonomy for a UAV (*unmanned aerial vehicle*). Firstly, it was analyzed many options of commercial solar cells available; after chosen, it was studied different geometries of applications of the cells on the UAV used; associating 21 cells in series, the operating electrical voltage resultant of the panel formed was 12.05V. It was chosen a boost type power converter module DC-DC (direct current), which is more suitable to the project specifications. Ground measurements were performed with the photogenerator system, it was possible to compare with the flight's data before the application; the mean power in flight given by the UAV's batteries was 113.08W; in ground tests with only the photovoltaic system applied, it reached the electrical mean power of 26.52W. Finally, it was estimated an increase of 27 minutes of autonomy, that represents 35.7%, compared to 1 hour and 15 minutes without the solar power system proposed – even though only 41% of the aircraft's available area was used, due to limitations imposed by the geometry.

Keywords: UAV. Drone. Photovoltaic cell. Solar energy. PixForce.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Drone de asa rotativa com 8 conjuntos de motores.....	14
Figura 2 – Drone de asa fixa.....	14
Figura 3 – Skywalker X8	16
Figura 4 – Célula mono (a) e policristalina (b).....	21
Figura 5 – Konarka painel flexível.....	23
Figura 6 – Painéis transparentes de filmes finos.....	23
Figura 7 – Circuito modelo de uma célula fotogeradora	26
Figura 8 – Curva de corrente por tensão elétrica em um painel fotogerador.....	26
Figura 9 – Curva de potência gerada por tensão elétrica em um painel fotogerador	27
Figura 10 – Circuito CC com carga resistiva	32
Figura 11 – Formas de onda das tensões [V] de entrada, saída e corrente [A] no circuito CC.....	33
Figura 12 – Circuito buck com carga resistiva	35
Figura 13 – Formas de onda das tensões [V] de entrada, saída e corrente [A] pelo indutor no buck	36
Figura 14 – Circuito boost com carga resistiva	37
Figura 15 – Formas de onda das tensões [V] de entrada, saída e corrente [A] pelo indutor no boost	40
Figura 16 - Formas de onda aumentadas das tensões [V] de entrada, saída e corrente [A] pelo indutor no boost	41
Figura 17 – Circuito buck-boost com carga resistiva.....	43
Figura 18 – Formas de onda das tensões [V] de entrada, saída e corrente [A] pelo indutor no buck-boost.....	44
Figura 19 – Circuito Flyback com carga resistiva.....	45
Figura 20 – Conversor boost adquirido para regulação de tensão.....	47

Figura 21 – Direções de rotação de uma aeronave.....	49
Figura 22 – Bateria LiPo 5Ah	50
Figura 23 – Controlador de voo.....	50
Figura 24 – ESC 85A	51
Figura 25 – Motor <i>outrunner</i>	52
Figura 26 – Servo motor	52
Figura 27 – Power Molule	53
Figura 28 – Telemetrias.....	54
Figura 29 – Estação base e controle remoto.....	54
Figura 30 – GPS e bússola.....	55
Figura 31 – Sistema de medição da velocidade relativa ao ar.....	56
Figura 32 – Exemplo de configuração interna dos blocos de uma asa fixa.....	57
Figura 33 – Blocos de funcionamento interno do VANT antes da aplicação do sistema fotovoltaico	58
Figura 34 – Circuito representativo do experimento da escolha da proteção mecânica	59
Figura 35 – Foto da estrutura montada para o experimento da escolha da proteção mecânica.....	60
Figura 36 – Fotos da montagem dos painéis na estrutura	61
Figura 37 – Super capacitores	63
Figura 38 – Sistema fotovoltaico	64
Figura 39 – Blocos de funcionamento interno do VANT depois da aplicação do sistema fotovoltaico	65
Figura 40 – Dados de um voo sem o sistema fotovoltaico	69
Figura 41 – Tensão elétrica do teste 1.....	71
Figura 42 – Integral da corrente elétrica no teste 1	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência teórica, laboratorial e comercial de algumas células solares.....	22
Tabela 2 – Dados do experimento para escolha da proteção adesiva a ser utilizada .	66
Tabela 3 – Comparativo entre os testes	72

LISTA DE SIGLAS

CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
ESC	<i>electronic speed controller</i>
GPS	<i>global positioning system</i>
IGBT	<i>insulated gate bipolar transistor</i>
LiPo	polímero de lítio
MOSFET	<i>metal oxide semiconductor field effect transistor</i>
MPPT	<i>maximum power point tracking</i>
P&O	método da perturba e observa
PM	<i>power module</i>
PSIM	<i>power simulator</i>
PWM	<i>pulse width modulation</i>
RTL	<i>return to launch</i>
STC	<i>standard test conditions</i>
UAV	<i>unmanned aerial vehicle</i>
VANT	veículo aéreo não tripulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 DRONES DE ASA FIXA NA ATUALIDADE.....	15
1.2 O PROBLEMA DA AUTONOMIA.....	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	19
2.1 PRINCIPAIS TIPOS DE CÉLULAS SOLARES FOTO-GERADORAS DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE.....	20
2.2 EXEMPLOS COMERCIAIS.....	22
2.3 CARACTERIZAÇÃO OPERACIONAL.....	24
2.3.1 A célula escolhida para a aplicação.....	24
2.3.2 Modelo elétrico do sistema fotogerador.....	25
2.3.3 Regulação da fonte energética.....	28
3 CONVERSORES CC-CC	29
3.1 LÓGICA DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA, O MPPT.....	30
3.2 TOPOLOGIAS CLÁSSICAS DE CONVERSORES CC-CC CHAVEADOS POR PWM .	31
3.2.1 Circuitos CC	32
3.2.2 Buck.....	34
3.2.3 Boost	37
3.2.4 Buck-Boost	42
3.2.5 Flyback	45
3.3 ESCOLHA DO CONVERSOR PARA A APLICAÇÃO.....	46
4 PROJETO	48
4.1 BLOCOS INTERNOS DO VANT PF2.....	48
4.2 ESCOLHA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO MECÂNICA DAS CÉLULAS SOLARES	59
4.3 APLICAÇÃO DO SISTEMA NA AERONAVE.....	60
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	66
5.1 SISTEMA DE PROTEÇÃO MECÂNICA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	66

5.2 TESTES DE POTÊNCIA DO SISTEMA.....	67
5.2.1 Sem o sistema fotovoltaico	67
5.2.2 Com o sistema fotovoltaico	70
5.2.3 Comparativo entre os casos sem e com o sistema fotovoltaico	72
6 CONCLUSÃO.....	74
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A história dos drones começou em 1883 quando Douglas Archibald instalou um anemômetro a uma linha de uma pipa¹, a sua intenção era obter medidas da velocidade do vento em altitudes de até 1200 pés. Cinco anos depois Arthur Batat instalou uma câmera em uma pipa e fez a primeira foto aérea em 20 de junho de 1888, na França. Charles Kettering projetou a primeira aeronave não tripulada, ela era guiada para um alvo por um sistema de presença pneumática e controle elétrico (PUSCOV, 2002).

O veículo aéreo não tripulado (VANT) é uma sigla derivada do Inglês UAV – *unmanned aerial vehicle* (ANAC, 2012) –, no entanto é mais conhecido popularmente e largamente usual na comunidade técnico/científica como drone, o qual significa zangão em Inglês.

No geral, pode-se classificar os drones em dois tipos, os de asa rotativa e os de asa fixa (CORRÊA, 2016). Asa rotativa, porque possuem hélices rotativas, as quais geram a sustentação necessária para a aeronave durante o voo; também são conhecidos por multirrotores, já que geralmente possuem combinações de 3, 4, 6 e 8 conjuntos de motores. Os drones de asa fixa usam da geometria (principalmente o ângulo de ataque da asa) e velocidade relativa ao ar para conseguir a força de sustentação (EBERHARDT, 1999). A Figura 1 e a Figura 2 ilustram exemplos de drones em asa rotativa e fixa.

¹ Também conhecida como pandorga ou papagaio.

Figura 1 – Drone de asa rotativa com 8 conjuntos de motores



Fonte: DJI® (2016, imagem digital).

Figura 2 – Drone de asa fixa



Fonte: DelairTech® (2016, imagem digital).

1.1 DRONES DE ASA FIXA NA ATUALIDADE

Os drones começaram a ganhar espaço significativo não apenas em pesquisas acadêmicas, mas também na economia em diversos setores devido à grande versatilidade. O setor florestal, agrônômico, segurança pública, publicidade, indústria de brinquedos, mineração, construção civil, entre outros são exemplos disso. Segundo estudos de tendências econômicas para o futuro, o crescimento desta tecnologia na economia será longínquo: Jenkins (2013) diz que mais de 70.000 novos empregos serão criados nos Estados Unidos nos próximos três anos (a partir de 2015) nas áreas que abrangem desde o desenvolvimento e a manutenção de VANTs até setores comerciais e serviços.

As aplicações para estes sistemas não tripulados ainda estão sendo descobertas devido a sua diversidade. Um grande exemplo é a transmissão de internet para locais remotos, nos quais mais de 4 bilhões de pessoas ainda não possuem acesso à web (ZUCKERBERG, 2016), como os projetos em desenvolvimento pelas empresas Google e FaceBook. O projeto Aquila, que vem sendo desenvolvido pelo FaceBook utiliza um drone de asa fixa. Já o Google leva internet para locais remotos com balões estratosféricos (até mais que 20km de altitude em relação ao nível do mar); o projeto é denominado de "*loon*", de "*baloon*" (balão, em inglês) (SOLVEFORX, 2016).

O Aquila é um exemplo de Estado da Arte da tecnologia em drones; apenas citando algumas características que chamam a atenção: possui envergadura maior que um Boeing 737², massa inferior a 1000 libras (~453,6 kg) e consumo médio de 5000 W de potência para funcionamento pleno (ZUCKERBERG, 2016). Detalhe para a utilização de painéis fotovoltaicos que recarregam as baterias da aeronave durante o voo a mais de 18 km de altitude, na qual a interferência atmosférica da radiação solar é muito menor, inclusive não há nuvens.

² Avião comercial largamente utilizado, aproximadamente 34 metros de envergadura.

Uma aplicação largamente utilizada no Brasil na área florestal é o eBee da SenseFly: uma plataforma de asa fixa com menos de 1 metro de envergadura e menos de 1 kg de massa. Um exemplo de empresa de sensoriamento com atuação na área é a Geoassessoria, de Canoinhas, SC.

Dentre os mais diversos tipos de drones comerciais, este trabalho pode ser descrito como o estudo e desenvolvimento da aplicação de um sistema fotovoltaico em uma estrutura de asa fixa, o Skywalker X8 da FPVModels da categoria micro (até 5kg de massa) pela categorização de Arjomandi (2006). Plataforma base para o principal drone desenvolvido pela empresa PixForce, o PF2. Ele dispõe de uma área nominal de 0,8m².

Figura 3 – Skywalker X8



Fonte: Do autor (2016).

A PixForce é uma *startup*³ de sensoriamento remoto que utiliza drones comerciais e drones desenvolvidos pela própria empresa. O sensoriamento remoto é realizado por meio da coleta de imagens de alta resolução por câmeras embarcadas nos VANTs. O PF2 está sendo desenvolvido de forma a se tornar um produto

³ Empresa de realização de atividades ligadas à pesquisa, ao desenvolvimento e à investigação de ideias inovadoras.

diferenciado por carregar mais massa e ter maior autonomia de voo se comparado com os demais da categoria.

1.2 O PROBLEMA DA AUTONOMIA

Nas atuações de campo (coleta de imagens) da PixForce e qualquer outra empresa que preste tal serviço, é rotineira a prática da escolha de um bom lugar para lançamentos e pousos das aeronaves por diversos motivos, entre eles: a direção do vento, altitude relativa às áreas adjacentes, visibilidade e distância da área de interesse da missão (área para levantamento aéreo fotográfico de interesse) a ser realizada em relação ao local de lançamento e pouso escolhidos. O último citado tem relevância por ser diretamente relacionado com o desperdício de energia das baterias em deslocamento aéreo que não é útil para o sensoriamento remoto. Tem-se então uma das especificações mais desejadas em um VANT: a maior autonomia possível, ou seja, o maior tempo possível do drone no ar sem a substituição de baterias.

Neste sentido, surge a ideia de aumentar a autonomia de voo. Tal parâmetro possibilita também aumentar a área a ser levantada em cada voo, otimizando o tempo da equipe de campo.

Numa lógica simples, basta aumentar a quantidade de energia que a aeronave carrega para aumentar a autonomia de voo, colocando mais baterias a bordo. No entanto, quanto mais massa a aeronave carrega, maior é o gasto energético com os motores para mantê-la no ar. Dessa forma se busca um ponto máximo de autonomia em função da quantidade de baterias que o VANT pode carregar por diversos métodos, os quais divergem do escopo deste trabalho.

Então, surge neste contexto a ideia de obter energia durante o voo para completar a energia armazenada nas baterias. Pensando em opções de geração de energia existentes, que sejam possíveis de serem adaptadas em um drone, constata-

se que a geração de fontes eólicas não se justifica em um sistema que utiliza a aerodinâmica para se sustentar. Já a energia solar, uma fonte de energia geralmente abundante é aplicável. Para a transformação em energia elétrica, células fotovoltaicas são utilizadas como ferramenta.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Ao final deste trabalho, espera-se que a aplicação do sistema fotovoltaico seja efetiva no acréscimo de autonomia da aeronave Skywalker X8. Para viabilizar a leitura dos parâmetros de consumo energético durante o próprio voo da chamada estação base (CORRÊA, 2016), serão utilizados sensores de corrente elétrica e tensão elétrica de módulos comerciais.

2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O Francês Edmond Becquerel foi pioneiro com experimentos de painéis fotogeradores em 1839, ele observou pela primeira vez o efeito fotovoltaico. Ao expor à luz dois eletrodos de prata em um eletrólito, observou a “produção” de corrente elétrica. Mais tarde, em 1877, os americanos W.G. Adams e R.E. Day construíram, baseados em eletrodos de selênio, a primeira célula solar fotogeradora que produzia corrente elétrica quando exposta a radiação solar (PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON, 1876).

Com a evolução da indústria de semicondutores, surgiram diversas tecnologias de fabricação, entre elas estão as técnicas de dopagem – na busca de propriedades de condução controlada específicas – e as resoluções cada vez maiores alcançadas em processos como a litografia⁴. Surgem, também, os variados tipos de painéis solares geradores, cada um com características técnicas específicas, as quais serão descritas ao longo deste capítulo.

O princípio físico do efeito da foto-geração de energia pode ser resumido da seguinte forma:

A dopagem do semicondutor de silício – o qual possui 4 elétrons na camada de valência – com elementos trivalentes gera um substrato do tipo p , ou seja, positivo (com falta de elétrons ou excesso de lacunas), já a dopagem com elementos pentavalentes gera um substrato do tipo n , ou seja, negativo (com excesso de elétrons). Uma junção pn é obtida da união desses substratos (p e n), criando uma camada chamada de camada de depleção (os elétrons da superfície do substrato do tipo n migram para o substrato do tipo p , neutralizando a região próxima da superfície de contato entre os substratos). Surge, então, um campo elétrico, o qual é a causa para a diferença de potencial (V_{pn}) que pode ser observada entre os terminais de tal junção. Após estabelecido um equilíbrio neste sistema, apenas ocorrerá transporte de carga,

⁴ Processo de gravação de padrões em materiais.

ou seja, elétrons atravessando a camada de depleção (corrente elétrica) do lado n para o lado p se houver excitação de uma fonte externa, no caso esta fonte é a radiação solar (COELHO, 2008).

Os geradores fotovoltaicos podem ser caracterizados hierarquicamente, segundo Coelho (2008), como sendo a célula fotovoltaica o elemento básico; em função da limitação de potência desta unidade, é possível arranjar as células formando um módulo fotovoltaico; os módulos podem ainda serem associados formando os chamados arranjos ou painéis fotovoltaicos.

Uma das características técnicas mais relevantes de uma célula fotogeradora é a sua eficiência energética η . Pode ser definida como a razão entre a potência máxima $P_{m\acute{a}x}$ que pode ser gerada nos terminais de saída, pela potência de radiação G que incide sobre a célula (RODRIGUES, 2009). Em termos percentuais temos:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{G} \cdot 100 \quad (1)$$

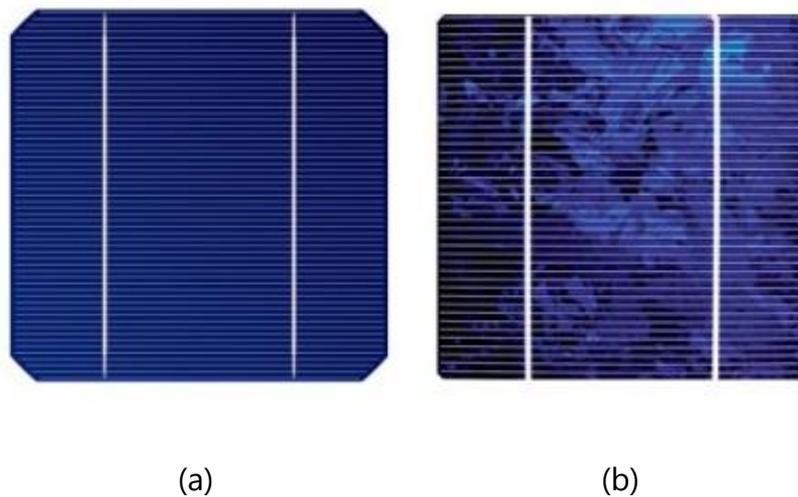
2.1 PRINCIPAIS TIPOS DE CÉLULAS SOLARES FOTO-GERADORAS DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE

As células de silício monocristalino são compostas de matérias muito puras se comparadas com os outros tipos de células, ou seja, apresentam baixos níveis de impurezas (outros elementos químicos com características não desejáveis nas aplicações citadas). No entanto, para alcançar tais níveis de pureza, são necessários processos industriais mais caros e mais lentos para extrair o silício "puro" da sua matéria-prima, o dióxido de silício. Inicialmente, em um processo tradicional, é desoxidado, purificado e solidificado, alcançando níveis de pureza entre 98 e 99% (PORTAL ENERGIA, 2016, texto digital). Elas apresentam aparência homogênea pela

composição com baixos níveis de impurezas, são elas as mais eficientes produzidas em larga escala e disponíveis comercialmente.

As de silício policristalino possuem aparência heterogênea por apresentarem composição não tão pura quanto a de monocristal; fato que explica a menor eficiência energética e também o menor custo de fabricação. Em ambas, mono e policristalina, a coloração pode variar com o tipo de tratamento antirreflexivo utilizado, são rígidas e quebradiças. A Figura 4 exemplifica essa aparência.

Figura 4 – Célula mono (a) e policristalina (b)



Fonte: Panel types crystalline (2016, imagem digital).

Já nos painéis de silício amorfo (a-Si), a produção energética é reduzida; portanto, foram tradicionalmente pouco utilizados, a não ser em pequena escala, como em calculadoras de bolso. Não obstante, inovações permitiram utilização em larga escala. Na combinação de várias camadas em uma técnica chamada de "empilhamento", alcançam-se resultados de eficiências energéticas maiores em comparação ao uso tradicional do silício amorfo.

Com tecnologia de fabricação diferenciada, as células de filmes finos utilizam menos matéria-prima do princípio ativo em sua composição, são mais adequadas para

operação em temperaturas mais elevadas, além de serem flexíveis e poderem operar em superfícies não planas (VILLALVA, 2015). Elas podem ser caracterizadas pela deposição de uma camada fina de material fotovoltaico (silício amorfo; telureto de cádmio; cobre, índio e gálio de seleneto; células orgânicas) depositado sobre um substrato (PORTAL SOLAR, 2016, texto digital).

A Tabela 1 resume dados de eficiência, em valores percentuais, de casos teóricos, laboratoriais e comerciais das tabelas dos textos digitais de Green (2000).

Tabela 1 – Eficiência teórica, laboratorial e comercial de algumas células solares

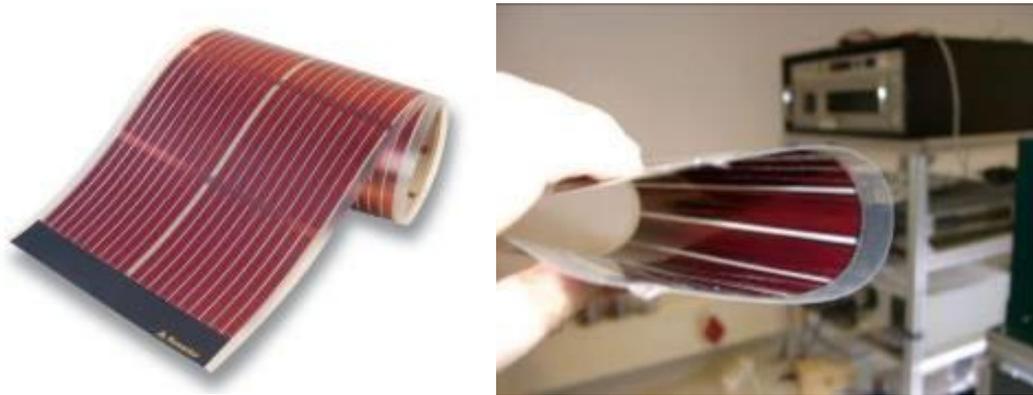
Tipo de célula	Eficiência (%)		
	Teórica	Laboratório	Comercial
Silício monocristalino	30,0	24,7	12 a 14
Silício concentrado	27,0	28,2	13 a 15
Silício policristalino	25,0	19,8	11 a 13
Silício amorfo	13,0	4 a 7	3 a 5

Fonte: Adaptado pelo autor baseado em Green (2000, texto digital).

2.2 EXEMPLOS COMERCIAIS

Entre as células comerciais que chamam a atenção está a Konarka Power Plastic® que, apesar da baixa eficiência de 6%, apresenta 0,5 mm de espessura do material, possui resistência a água e é muito flexível como apresentado na Figura 5.

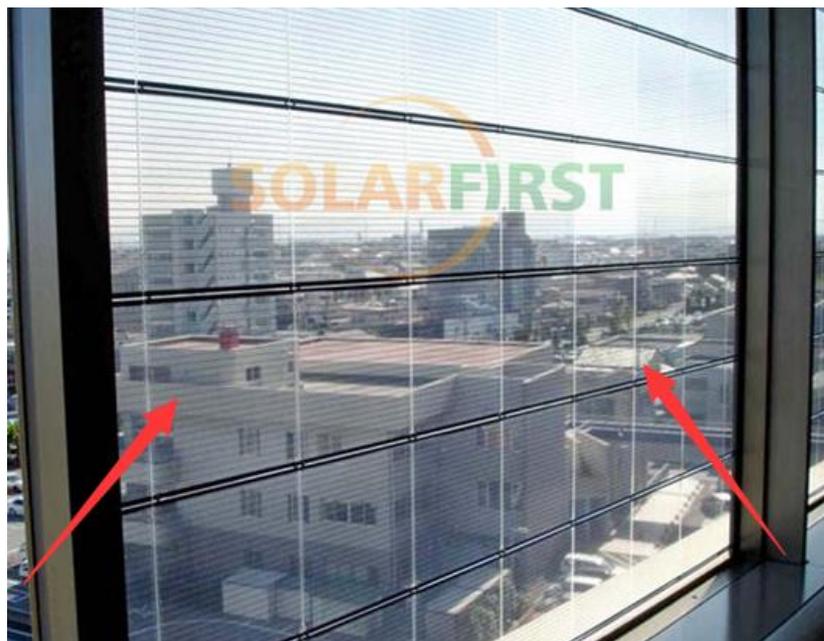
Figura 5 – Konarka painel flexível



Fonte: Konarka® (2016, imagem digital).

Outro exemplo é da SolarFirst®: painéis de filmes finos transparentes de telureto de cádmio (CdTe), os quais são usualmente aplicados em residências substituindo ou complementando janelas, portas e pergolados de vidro. Com 0,72 metros quadrados de área e 6,8mm de espessura, opções com transparências de 10 a 40% variam a potência elétrica nominal de 48 a 72W.

Figura 6 – Painéis transparentes de filmes finos



Fonte: SolarFirst® (2016, imagem digital).

2.3 CARACTERIZAÇÃO OPERACIONAL

Na ideia de utilizar células solares que reproduzam o efeito da foto-geração em um sistema completamente embarcado (aqueles que ficam dentro da aeronave durante o voo), são desejáveis parâmetros específicos na escolha dos painéis:

- A menor massa possível: devido ao principal objetivo que é aumentar a autonomia de voo, quanto menos massa a aeronave carregar, menor é o gasto energético com o motor principal do avião;
- De alto rendimento: para aproveitar ao máximo a área útil (se tratando de radiação solar) da aeronave;
- Flexíveis: considerando que o quanto menos este sistema influenciar na aerodinâmica do avião, melhor; então, as placas devem se moldar à superfície da aeronave;
- Comerciais: no sentido de serem acessíveis para a aplicação desejada.

2.3.1 A célula escolhida para a aplicação

Por fim, a escolha das células a serem aplicadas à aeronave se idealiza com células do tipo filme fino e flexíveis e com a maior eficiência possível. As células de filmes finos de material silício monocristalino da MAXEON SUNPOWER® e apresentam, segundo o fabricante, as características citadas na sequência. Elas foram obtidas em condições padrão de teste (*Standard Test Conditions – STC*), que são valores predefinidos de radiação solar, índice de massa de ar e temperatura, com o objetivo de se criar um padrão nos catálogos para comparação entre módulos de diferentes fabricantes.

- Tensão elétrica máxima de 0,682V;
- Tensão elétrica de operação de 0,574V;

- Corrente elétrica máxima de 6,24A;
- Corrente elétrica de operação de 5,83A;
- Dimensões: 125 x 125mm de superfície, 145 micrometros de espessura do material ativo;
- Máxima potência: 3,34W;
- Eficiência energética percentual: 21,8%.

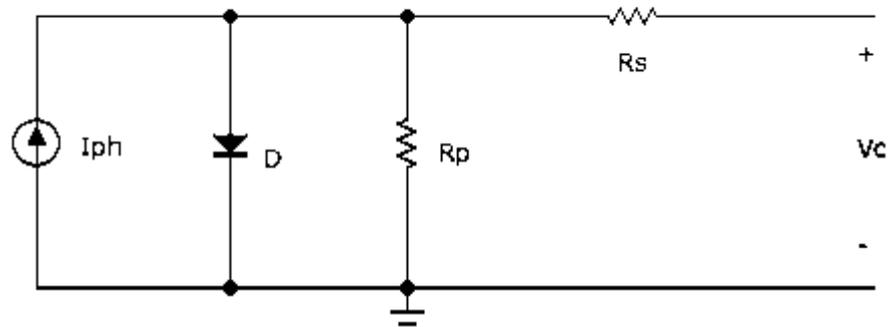
Para complementar, foi realizada a medida de massa das células por uma balança mecânica, uma vez que tal característica não foi fornecida pelo fabricante. Como será descrito na Seção 4.2, foram aplicadas sobre a superfície da aeronave 21 células, elas somaram 190 gramas na medida de massa.

2.3.2 Modelo elétrico do sistema fotogerador

Os painéis foto-geradores podem ser modelados como uma fonte ideal de corrente elétrica I_{ph} em paralelo com um diodo D e resistências paralelo R_p e *shunt* R_s de acordo com a Figura 7; onde a corrente I_{ph} tem relação com o ângulo de incidência da radiação solar α de acordo com a Equação (2). P_{sol} é a intensidade de radiação solar em W/m^2 , T e T_r a temperatura ambiente e temperatura de referência respectivamente em Kelvin, e I_{sc} a corrente de curto-circuito (CASARO, 2008).

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha \cdot (T - T_r)] \cdot \frac{P_{sol}}{1000} \quad (2)$$

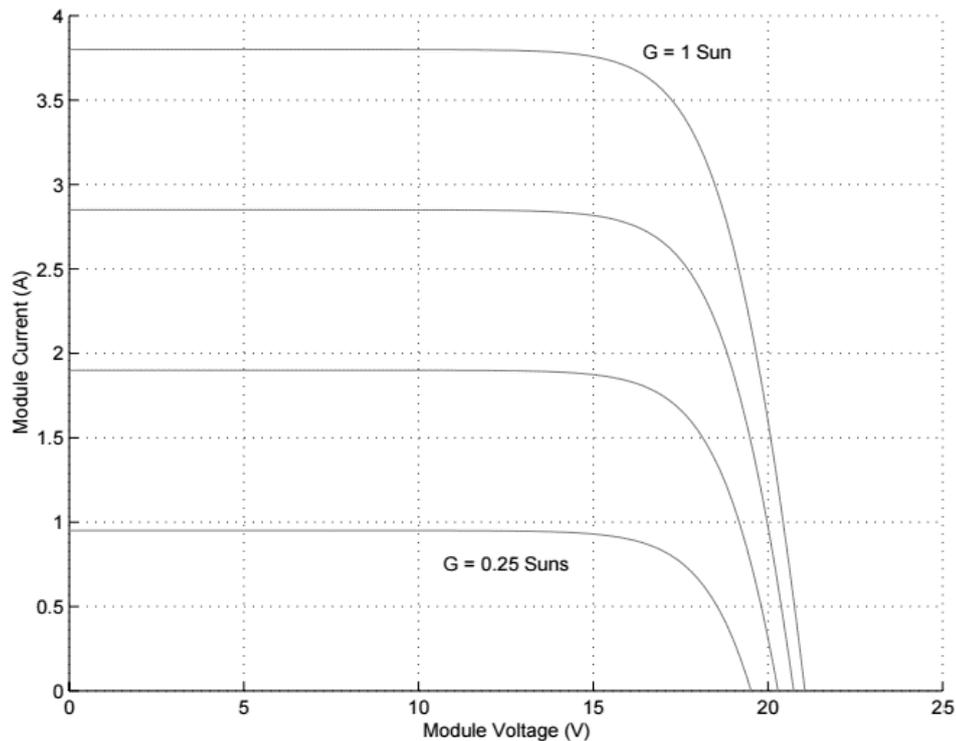
Figura 7 – Circuito modelo de uma célula fotogeradora



Fonte: Do autor (2016).

Se plotarmos a curva de tensão elétrica por corrente elétrica na saída de uma célula fotovoltaica, é possível ver a curva de um diodo, no entanto invertida em função da definição do sentido de corrente da célula, como no gráfico da Figura 8, onde G representa o nível de radiação solar que atinge o painel, medido na unidade de 1 sol (*sun*), o qual equivale a $1000\text{W}/\text{m}^2$.

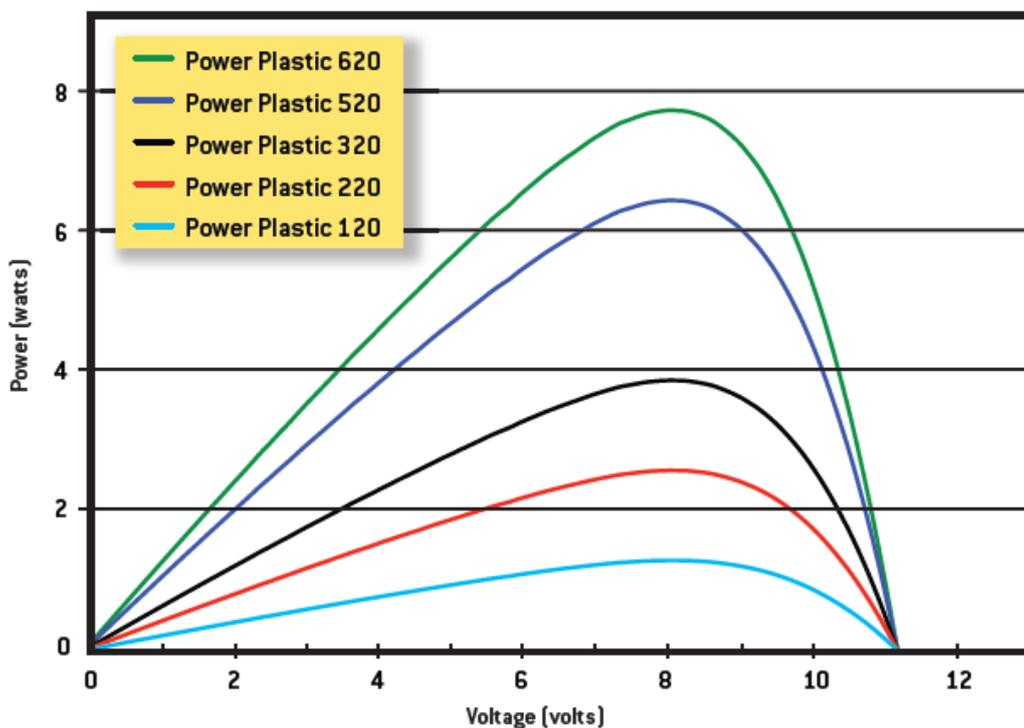
Figura 8 – Curva de corrente por tensão elétrica em um painel fotogerador



Fonte: Walker (2001).

Para facilitar a visualização da dependência que tem a potência gerada em função da tensão elétrica em uma célula, são plotadas curvas como as da Figura 9, nas quais podemos observar os picos de potência com os quais se deseja operar. Eles são alvos dos sistemas de MPPT (*maximum power point tracking*) e podem ser implementados de diversas formas, como mostrado na Seção 3.1.

Figura 9 – Curva de potência gerada por tensão elétrica em um painel fotogerador



Fonte: Konarka® (2016, imagem digital).

Como é possível observar, a tensão elétrica nos terminais do painel fotovoltaico varia com o ângulo de radiação sobre a aeronave α e com perturbações externas ao sistema, como variação de nebulosidade e variações de potência luminosa sazonais e diárias G . Fato que nos leva a pensar em um sistema de regulação da tensão de saída dos painéis geradores para conectar ao barramento de potência da aeronave; na Seção 4.1 será apresentado o sistema interno tradicional do VANT da PixForce.

Finalmente, podemos simplificar a modelagem das células fotovoltaicas como uma fonte de tensão elétrica constante e dependente da intensidade de radiação solar incidente sobre ela. A intensidade de radiação mencionada depende, por sua vez, do ângulo formado entre o sentido de propagação da radiação solar e o vetor normal (vetor perpendicular ao plano formado pela superfície) de cada célula.

2.3.3 Regulação da fonte energética

Tal sistema de regulação necessita de algumas características específicas devido ao caso em questão: deve elevar a média de tensão para se conectar ao barramento de 16.8V.

Também é desejável o melhor aproveitamento de potência possível, ou seja, a maior potência possível que se pode extrair dos módulos de fotogeração. A curva de tensão por corrente elétrica também pode ser observada sobre o ponto de vista de potência: se escolhermos um ponto da curva e traçarmos uma linha até o eixo das abcissas e, da mesma forma, outra linha até o eixo das ordenadas, teremos no primeiro quadrante uma área que representa a potência elétrica fornecida pelas células solares naquelas condições de corrente e tensão. Para tal, um controle da escolha de tensão e corrente elétricas a se operar é desejável, e pode ser implementado utilizando técnicas de chaveamento dos conversores de potência segundo uma lógica de seguimento do ponto de máxima transferência de potência; também conhecido por MPPT.

3 CONVERSORES CC-CC

Na ideia de condicionar o sinal de fontes de tensão elétrica, são utilizados conversores de eletrônica de potência. Tais conversores podem transformar parâmetros como corrente elétrica de alternada (CA) para contínua (CC) e vice-versa, ou ainda, manter tal parâmetro de acordo com a especificação de cada projeto.

Como foi caracterizado na Seção 2.3, este trabalho necessita de uma operação de CC-CC, que significa que tanto a geração quanto a carga operam em corrente contínua.

Segundo Rashid (2014), os conversores CC-CC são divididos em dois tipos – os ressonantes e os chaveados por largura de pulso modulada (PWM – *pulse width modulation*) – e suas funções são:

- Converter uma entrada de tensão CC V_g em uma saída de tensão CC;
- Regular a tensão CC de saída contra variações de carga e linha;
- Reduzir (ondulação) da tensão CA na tensão CC de saída nos níveis desejados;
- Prover isolamento entre fonte e carga (nem sempre é requerido);
- Proteger o sistema de alimentação e fonte de entrada de interferências eletromagnéticas;
- Satisfazer vários padrões de segurança nacionais e internacionais.

3.1 LÓGICA DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA, O MPPT

Levando em consideração o caso em questão, ao qual as células fotovoltaicas serão a fonte de energia elétrica complementar, faz sentido otimizar a conversão de energia com a maior transferência de potência possível; ou seja, o sistema de condicionamento da potência deve buscar chegar o mais próximo possível do ponto de máxima transferência de potência possível.

Podemos caracterizar, então, o conversor CC-CC como sendo o atuador do sistema; e na parte de controle dos pulsos de chaveamento da lógica interna do conversor, podemos implementar diferentes técnicas. Para implementar técnicas de MPPT, existem várias lógicas, entre elas, estão:

- Método da tensão constante;
- Método perturba e observa;
- Método condutância incremental.

Coelho (2008) resume os métodos citados da seguinte forma.

O método da tensão constante opera buscando tornar sempre a tensão constante nos terminais de entrada do conversor, ou seja, nos terminais do arranjo fotogerador. A escolha da tensão ideal é dada pela tensão de máxima potência do STC, então se não estiver operando nas condições do STC, o método não possui validade; no entanto, ele possui vantagem por ser de extrema simples implementação.

O método da perturba e observa (P&O) utiliza a leitura de corrente e tensão por sensores para calcular a potência instantânea fornecida pelo painel. Com uma sequência de perturbações, numa sequência lógica, são realizadas novas medidas a cada amostra, a qual é comparada com o valor do estado anterior. Desta forma, é possível saber se a potência está diminuindo ou aumentando e, assim, buscar o ponto

de máxima potência. A desvantagem é a complexidade para implementação do algoritmo e a suscetibilidade a falhas em casos de variações abruptas das variáveis de medida.

Finalmente, o método da condutância incremental (CondInc) também tem como variáveis de medidas a tensão e a corrente, e também calcula a potência a cada iteração; no entanto calcula – além disso – a derivada da potência em relação à tensão elétrica. Dessa forma, é capaz de relacionar – diferente do P&O – a velocidade e a precisão na busca pelo MPPT, caracterizando uma operação com passo variável (o qual escolhe quanto tempo é necessário entre amostras para obter uma resposta rápida o suficiente, quando necessário).

3.2 TOPOLOGIAS CLÁSSICAS DE CONVERSORES CC-CC CHAVEADOS POR PWM

Nesta seção são exemplificados tipos clássicos de circuitos de conversores CC-CC chaveados por PWM. Nos circuitos apresentados nas figuras desta seção, as chaves acionadas pelos pulsos mencionadas são transistores bipolares de porta isolada, os IGBTs (do inglês, *insulated gate bipolar transistor*). No entanto, estas chaves também podem ser encontradas em conversores como sendo transistores de efeito de campo de óxido de metal semiconductor, os MOSFETs (do inglês, *metal oxide semiconductor field effect transistor*). Apesar do efeito físico ser significativamente diferente, as diferenças na prática estão relacionadas com as perdas por comutação e densidade de corrente (PETRY, 2012).

Os valores de tensão elétrica de entrada e tensão elétrica de saída (quando possível) utilizados nas simulações apresentadas nesta seção tem relação com os valores práticos apresentados no capítulo 4.

3.2.1 Circuitos CC

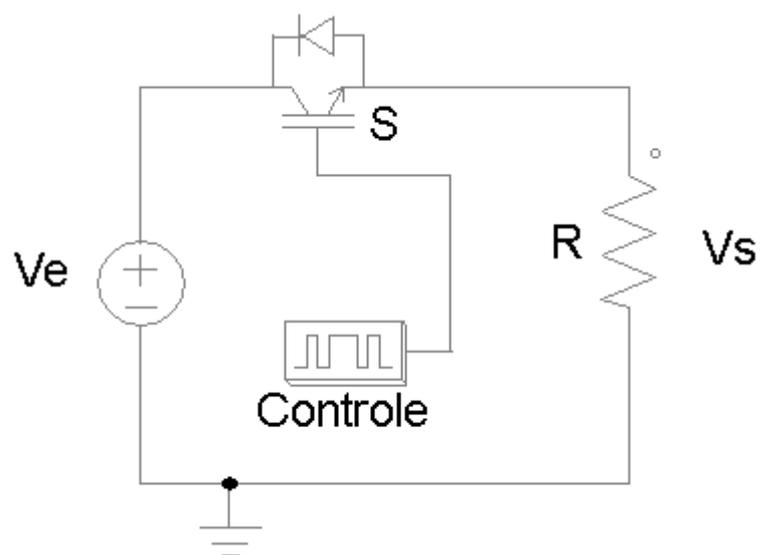
Um circuito simples rebaixador de tensão elétrica de CC pode ser visto na Figura 10. A chave **S** está operando em uma taxa ***d*** definida como:

$$d \equiv \frac{t_{ligado}}{t_{ligado} + t_{desligado}} = \frac{t_{ligado}}{T} \quad (3)$$

Onde $T = 1/f$ é o período do chaveamento de frequência f , t_{ligado} é o tempo em que a chave **S** está fechada e $t_{desligado}$ que ela está aberta. A média da tensão de saída V_s é dada em função da média da tensão de entrada V_e , por:

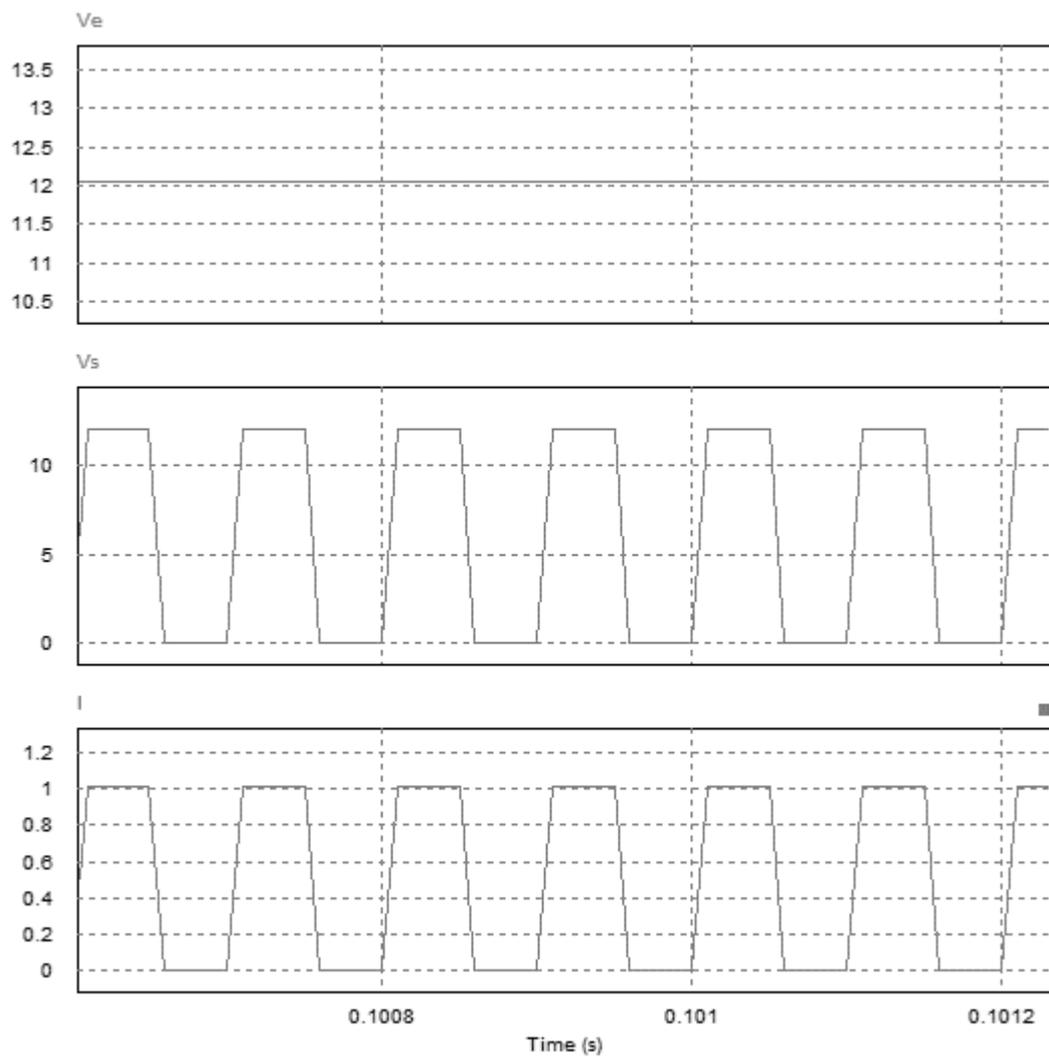
$$V_s = dV_e \quad (4)$$

Figura 10 – Circuito CC com carga resistiva



Foram atribuídos os parâmetros do circuito para: 12,05V de tensão de entrada, razão cíclica $d = 50\%$, frequência dos pulsos do circuito de controle igual a 10kHz e resistência de saída igual a $12\ \Omega$. As Formas de onda das principais variáveis da simulação realizada podem ser visualizadas na Figura 11.

Figura 11 – Formas de onda das tensões [V] de entrada, saída e corrente [A] no circuito CC



Fonte: Do autor (2016).

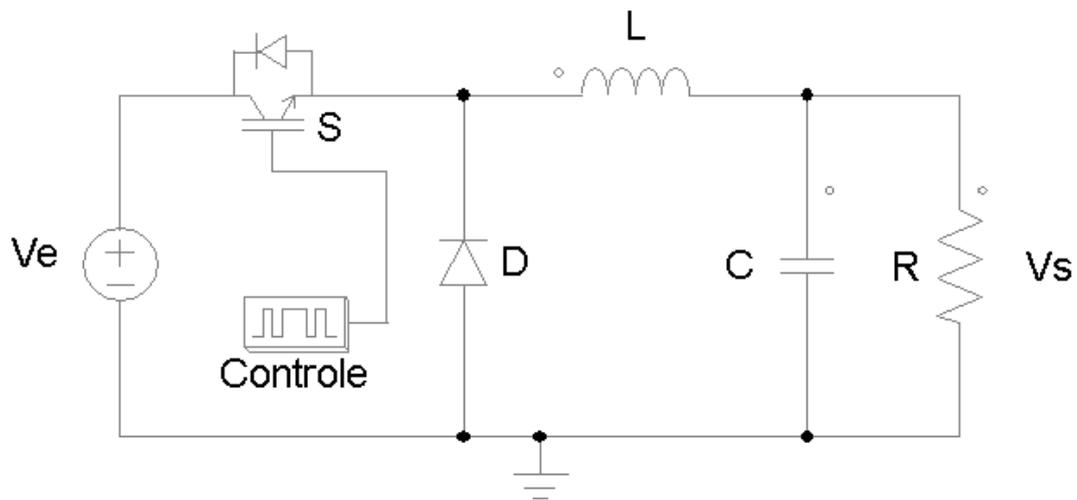
É importante ressaltar que a corrente I que flui na única malha do circuito tem a mesma forma da tensão de saída, apenas com um fator de multiplicação que é o valor da resistência de saída, relação da conhecida Lei de Ohm (Equação (5)). É possível observar que o formato recortado da tensão e corrente da simulação se justificam pelo fato do circuito ser composto apenas por uma fonte contínua de alimentação, uma carga e uma chave que liga e desliga o contato elétrico entre a entrada e a saída do circuito; por isso o nível médio da tensão de saída é menor que o nível médio da entrada. Entretanto, esta topologia não é muito utilizada justamente pela elevada oscilação que pode ser observada no sinal de saída.

$$U = R \cdot i \quad (5)$$

3.2.2 Buck

O conversor rebaixador de tensão buck com carga resistiva \mathbf{R} da Figura 12 apresenta um elemento reativo indutivo \mathbf{L} , no qual assume-se que a corrente i_L é sempre positiva, ou seja, operando em condições de condução contínua; um elemento reativo de tensão \mathbf{C} em paralelo com a carga regula as variações de tensão.

Figura 12 – Circuito buck com carga resistiva



Fonte: Do autor (2016).

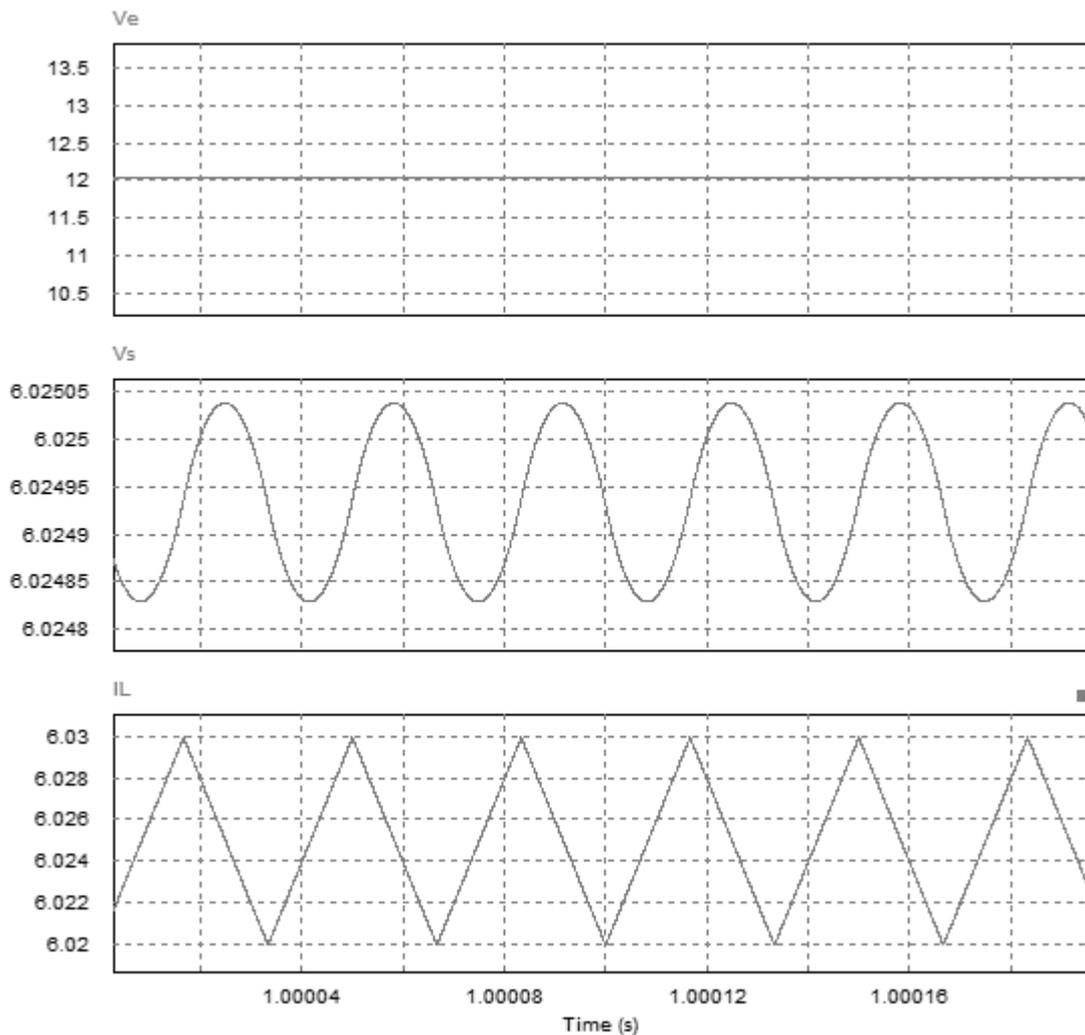
A função de transferência, definida pela taxa M_V da tensão de saída pela tensão de entrada, é:

$$M_V \equiv \frac{V_s}{V_e} = d \quad (6)$$

Pela Equação (6), é possível ver que a tensão de saída sempre será menor que a tensão de entrada, já que a taxa d de operação da chave varia de 0 a 1, também pode ser vista como valor percentual em que a chave está conduzindo (fechada).

Um exemplo com tensão de entrada de 12,05V, indutância de 10mH, capacitância de 200 μ F e resistência de saída de 1 Ω pode ser visualizado na Figura 13, com $d = 50\%$, temos que a média da tensão de saída V_s é a metade da média da tensão de entrada V_e , o que também pode ser visualizado aplicando tais valores na Equação (6). A frequência de chaveamento utilizada é de 30kHz.

Figura 13 – Formas de onda das tensões [V] de entrada, saída e corrente [A] pelo indutor no buck



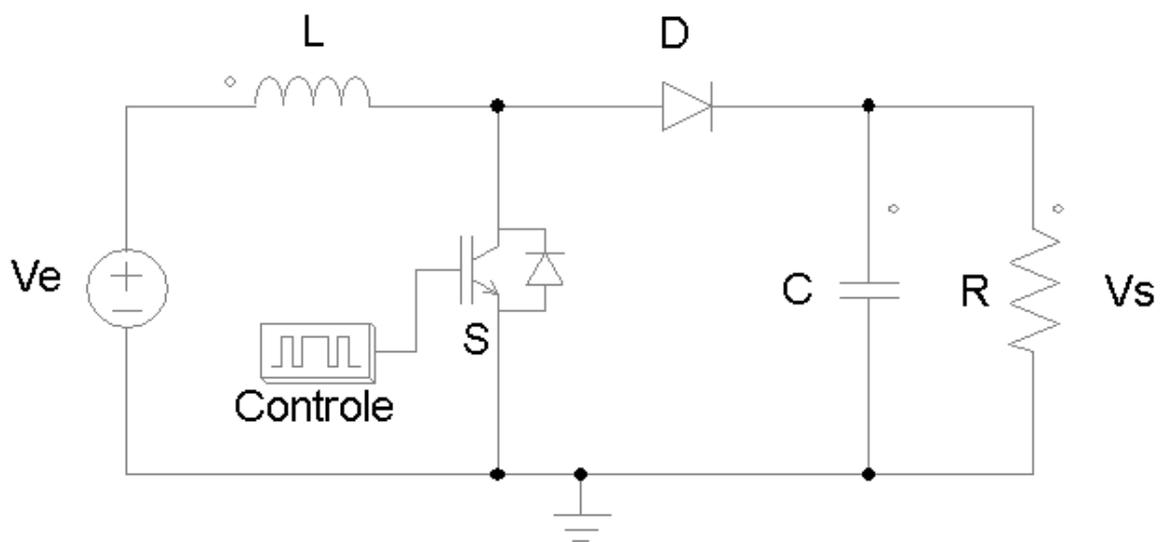
Fonte: Do autor (2016).

Vale ressaltar que a ondulação apresentada no gráfico da Figura 13 não apresenta magnitude relevante se comparada ao valor médio da função – em termos das aplicações desejadas neste trabalho. Os valores apresentados no eixo das ordenadas mostra o ponto em questão.

3.2.3 Boost

Com os mesmos princípios de funcionamento, o conversor do tipo boost dispõe de um indutor, um diodo, um capacitor e uma chave com os pulsos gerados por um sinal provido por um circuito de controle. A Figura 14 apresenta um exemplo de circuito boost com carga resistiva R . Devido à disposição dos elementos, o boost se caracteriza por ser elevador de tensão elétrica, ou seja, para qualquer valor da tensão de entrada não nulo V_e , a tensão de saída V_s terá módulo igual ao módulo da tensão de entrada multiplicado por um ganho maior que o unitário. O ganho é dependente da razão cíclica (*duty cycle*) d que chega à chave; esta relação é expressa matematicamente pela Equação (7).

Figura 14 – Circuito boost com carga resistiva



Fonte: Do autor (2016).

A função de transferência, definida pela taxa M_V da tensão de saída pela tensão de entrada, é:

$$M_V \equiv \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-d} \quad (7)$$

Podemos observar que para qualquer valor de d entre 0 e 1 a divisão resulta em um número menor que 1. Isto significa que para qualquer razão cíclica, o circuito terá tensão de saída maior que a tensão de entrada.

Na parte do ciclo em que a chave está fechada, o indutor fica polarizado sobre a tensão de entrada, e o diodo se comporta como circuito aberto (já que o potencial elétrico no cátodo é maior que no ânodo). Assim, o indutor acumula energia sobre forma de campo magnético; tal energia é transferida para o capacitor e à carga na outra parte do ciclo: quando a chave estiver aberta e o diodo se comportar como curto circuito (POMILIO, 2016).

É interessante ressaltar que o circuito de controle pode ser implementado de diversas formas. No controle em malha aberta, um parâmetro configurado determina a razão cíclica d pré-estabelecida e dessa forma opera independente dos valores da tensão de entrada ou saída do conversor. Pode ser útil em casos em que a variação da tensão de entrada não gera saídas fora da faixa de interesse, além de ser a forma mais simples de implementação.

No controle em malha fechada, podemos variar a razão cíclica com o objetivo de estabilizar uma das variáveis de interesse. No caso, desejamos uma tensão fixa na saída do conversor para alimentar a bateria, mesmo com variações da entrada devido a fatores citados nas seções anteriores.

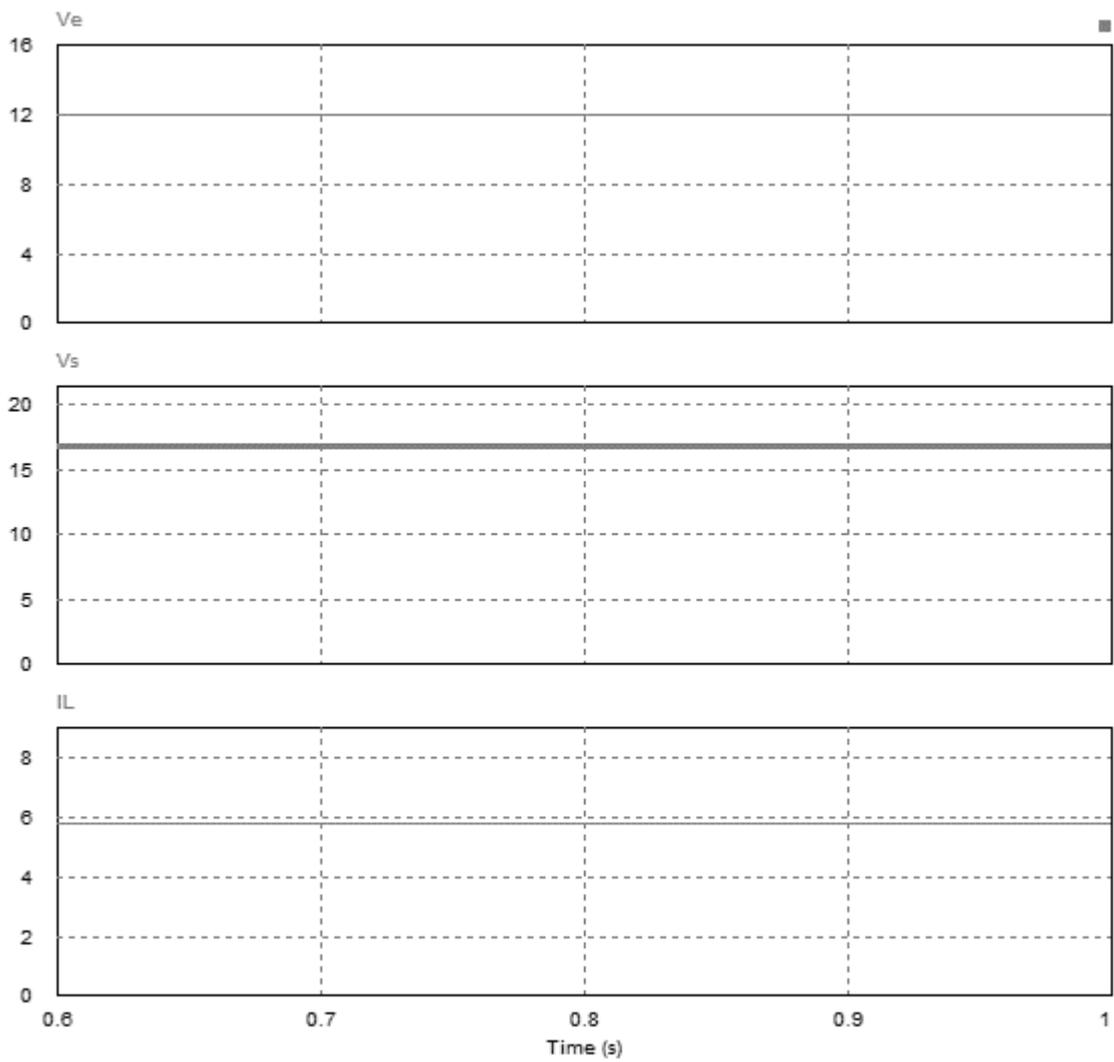
Para implementação desta lógica, o circuito de controle deve ler o sinal de tensão de saída para ter capacidade de atuar na razão cíclica dos pulsos da chave do conversor. Dessa forma, temos o chamado laço de realimentação (o qual envia este sinal da saída para o circuito de controle), e se faz possível a adequação às especificações do projeto.

Com $d = 28,27\%$, tensão de entrada igual a $12,05\text{V}$, resistência de saída igual a $4\ \Omega$, indutância igual a 100mH , capacitância igual a $200\mu\text{F}$, alcança-se a tensão de saída aproximadamente igual a $16,8\text{V}$. Podemos observar as formas de onda da simulação, realizada no software PSIM⁵, da Figura 15.

Para melhor visualizar o comportamento deste conversor, é possível escolher a faixa de tensões e corrente no PSIM. A Figura 16 mostra em detalhes o comportamento das principais variáveis do circuito. A ratificação relacionada ao destaque do detalhe realizada para o circuito buck, também é válida para o caso da Figura 16 e da Figura 18.

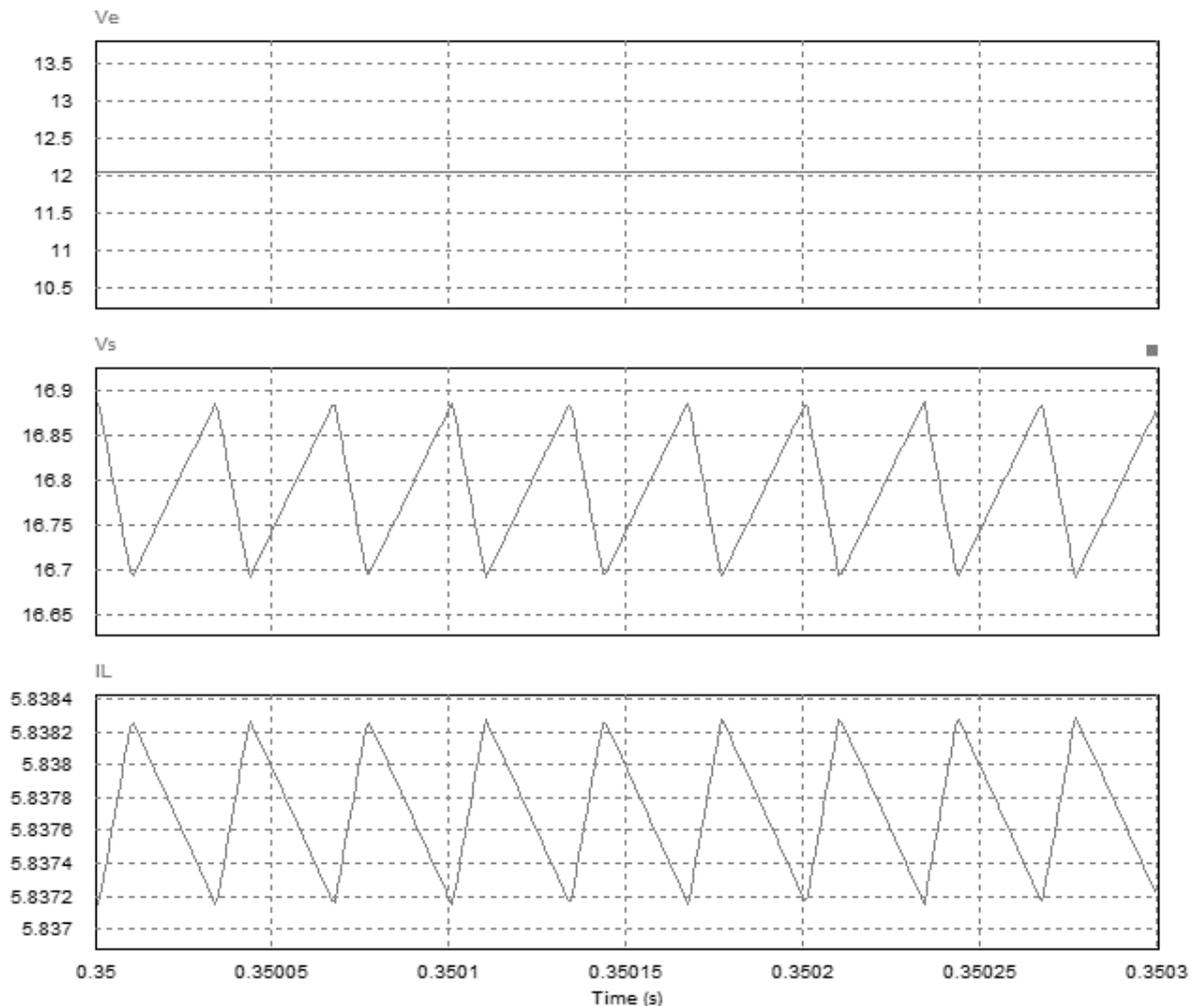
⁵ Software para simulação de circuitos de potência. Do inglês, *Power Simulator*, PSIM.

Figura 15 – Formas de onda das tensões [V] de entrada, saída e corrente [A] pelo indutor no boost



Fonte: Do autor (2016).

Figura 16 - Formas de onda aumentadas das tensões [V] de entrada, saída e corrente [A] pelo indutor no boost



Fonte: Do autor (2016).

A condução contínua de corrente elétrica no indutor pode ser visualizada graficamente: a curva resultante não atravessa o eixo das abcissas, ou seja, a corrente no indutor não é nula em parte alguma do período de operação (FAUSTO, 2014).

Um parâmetro importante em projetos na área é a ondulação $Ond_{\%}$ (também conhecida por *Ripple*), em valores percentuais, depende do valor máximo X_{max} , o valor mínimo X_{min} e o valor médio X_{med} da variável de interesse X no período (sendo X uma função periódica). Ele basicamente caracteriza o quanto a saída está variando em relação ao valor médio que a função apresenta naquele intervalo de um período. A Equação (8) define matematicamente a ondulação percentual.

$$Ond_{\%} \equiv \frac{X_{max} - X_{min}}{X_{med}} \cdot 100 \quad (8)$$

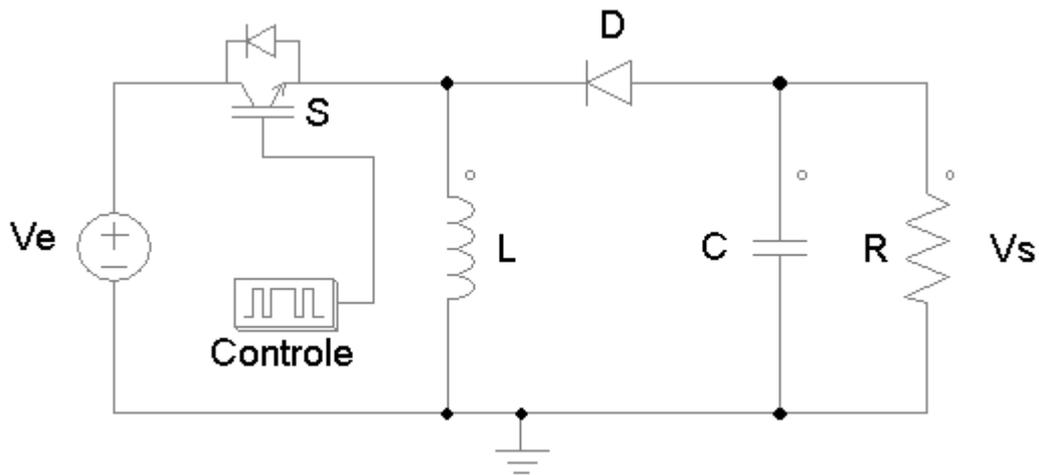
A condução na entrada do circuito é do tipo contínua, já que a corrente de entrada é a mesma que flui pelo indutor e a ondulação vale 0,0188%, calculado pela Equação (8). A ondulação percentual calculada nestas condições do circuito foi calculada pela Equação XX para a tensão de saída e vale 1,13%; para a corrente no indutor vale 0,0188%.

Vale lembrar que a ondulação da corrente é dependente das tensões de entrada e saída do conversor, da razão cíclica em operação, da indutância de L e da frequência de operação da chave. A ondulação da tensão no capacitor (no caso é também a tensão de saída) depende da ondulação da corrente no indutor, do período (ou frequência de chaveamento) e da capacitância de C (FAUSTO, 2014).

3.2.4 Buck-Boost

Com os mesmos princípios de funcionamento, o conversor do tipo buck-boost dispõe de um indutor, um diodo, um capacitor e uma chave com os pulsos gerados por um sinal provido por um circuito de controle. A Figura 17 apresenta um exemplo de circuito boost com carga resistiva R .

Figura 17 – Circuito buck-boost com carga resistiva



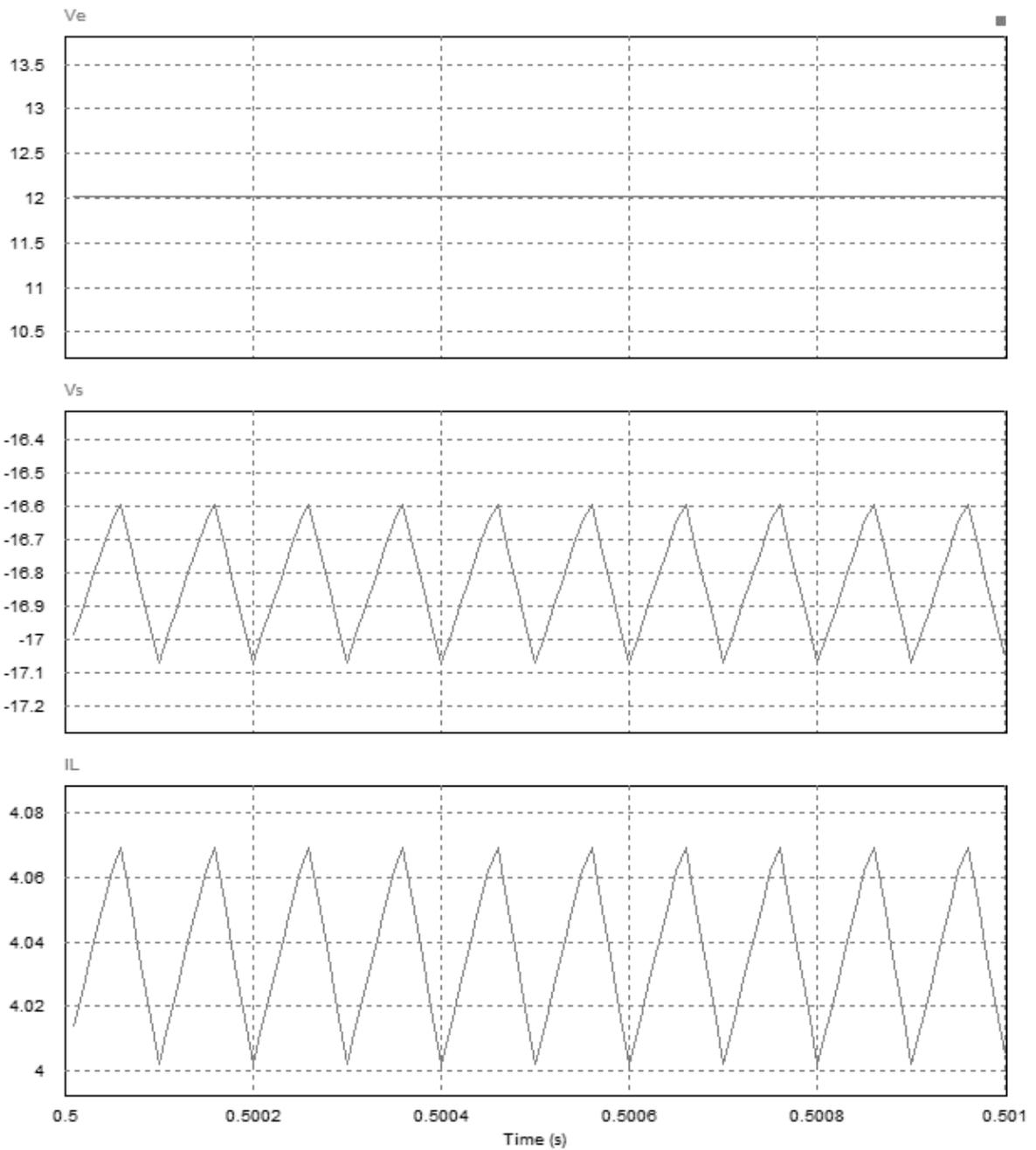
Fonte: Do autor (2016).

A função de transferência, definida pela taxa M_V da tensão de saída pela tensão de entrada, é:

$$M_V \equiv \frac{V_s}{V_e} = \frac{-d}{1-d} \quad (9)$$

Podemos observar que para determinados valores de d , a razão resulta em um número maior – em módulo – que 1 ; já para outros números a razão resulta em um número menor – em módulo – que 1 . Isto significa que o circuito pode ser um rebaixador ou elevador de tensão elétrica, dependendo da razão cíclica de operação da chave comandada pelo circuito de controle.

Figura 18 – Formas de onda das tensões [V] de entrada, saída e corrente [A] pelo indutor no buck-boost



Fonte: Do autor (2016).

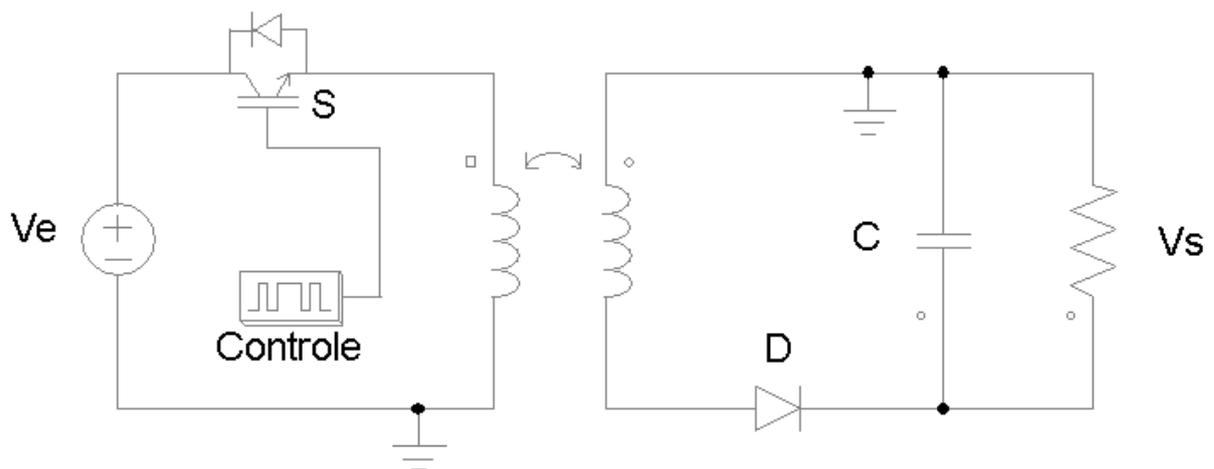
Com $d = 41,77\%$, tensão de entrada igual a 12,05V, resistência de saída igual a $10\ \Omega$, indutância igual a 10mH, capacitância igual a $200\ \mu\text{F}$, alcança-se a tensão de saída aproximadamente igual a 16,8V. Podemos observar as formas de onda da simulação, realizada no software PSIM, da Figura 18.

3.2.5 Flyback

O conversor do tipo Flyback é muito semelhante ao conversor buck-boost. A diferença está no elemento indutivo: no Flyback a entrada está isolada eletricamente da saída (galvanicamente isolada), já que o indutor é do tipo acoplado duplo, ou seja, o caminho para a condução energética entre as duas bobinas é magnético. Basta comparar as Equações (9) e (10), além da Figura 17 e da Figura 19 com os exemplos e verificar tal semelhança.

Os conversores do tipo flyback são largamente utilizados em aplicação que necessitam elevações de tensão em grandes taxas da magnitude da saída em relação à entrada, geralmente em ordens de grandeza. Isso porque a relação de espiras n do indutor acoplado é capaz de elevar a tensão proporcionalmente à diferença entre o número de espiras de cada bobina.

Figura 19 – Circuito Flyback com carga resistiva



Fonte: Do autor (2016).

A Equação (10) mostra a função de transferência do conversor. Como mencionado, muito semelhante à do conversor buck-boost, mas com o fator da relação do número de espiras.

$$\frac{nV_s}{V_e} = \frac{-d}{1-d} \quad (10)$$

As simulações realizadas para este conversor não foram apresentadas por não apresentarem diferença significativa em relação às simulações do conversor buck-boost. Para rever as curvas das simulações do conversor buck-boost, basta olhar para a Figura 18.

3.3 ESCOLHA DO CONVERSOR PARA A APLICAÇÃO

Devido a questões de disponibilidade do mercado brasileiro e a adequação às especificações de regulação de tensão elétrica do projeto descritas, foi escolhido um conversor CC-CC do tipo boost. Elevador de tensão em unidades de medida e não em ordens de grandeza, ele se adequa muito bem em outras especificações.

Tendo em vista a complexidade de implementação das lógicas de MPPT, além do tempo disponível para a realização deste trabalho, decidiu-se optar por um módulo comercial pronto do conversor do tipo boost. Entre as opções disponíveis, a opção que melhor se adaptou aos parâmetros de tensão de entrada e de saída, potência máxima de operação, massa e dimensões físicas, foi o módulo da UsinalInfo, que pode ser visto na Figura 20.

Ele tem como faixa de entrada de tensão valores de 10 a 32V e faixa de tensão de saída de 12 a 35V; já que a geração conjunto gerador resultante é de 12,05V de operação média e a bateria deve ser carregada em 16,8V. Tal conversor também atende à especificação de máxima potência que pode ser fornecida pelo conjunto das 21 células, que é de 70,12W, uma vez que ele está projetado para trabalhar com até 100W (sem refrigeração forçada). Tem menos de 65 gramas de massa e dimensões

suficientemente pequenas de 65 x 46 x 28 milímetros, se comparado com o espaço interno do PF2 disponível.

Figura 20 – Conversor boost adquirido para regulação de tensão



Fonte: UsinaInfo (2016, imagem digital).

Na Seção 4.1 são apresentadas as baterias utilizadas no drone. É importante ressaltar que o limite de corrente elétrica que o sistema dos painéis fornece, não é capaz de gerar potência suficiente para ultrapassar a corrente limite de operação contínua de entrada de cada uma das baterias, justificando a desnecessidade de um sistema limitante de corrente de saída do conversor CC-CC.

4 PROJETO

Neste capítulo serão necessárias algumas equações para o entendimento de alguns parâmetros do sistema elétrico utilizado na aeronave. A Equação (11) mostra como calcular a quantidade de energia E que uma bateria é capaz de fornecer ao sistema em uma descarga controlada⁶; ela depende diretamente da integral da corrente no tempo i , medida em Ampere vezes hora, e da tensão de meia carga V da bateria.

$$E = i \cdot V \quad (11)$$

Para o cálculo do tempo que as baterias descarregam, a Equação (12) é necessária. A energia E que é transferida na descarga da bateria depende da potência média demandada P e do tempo t da descarga em questão.

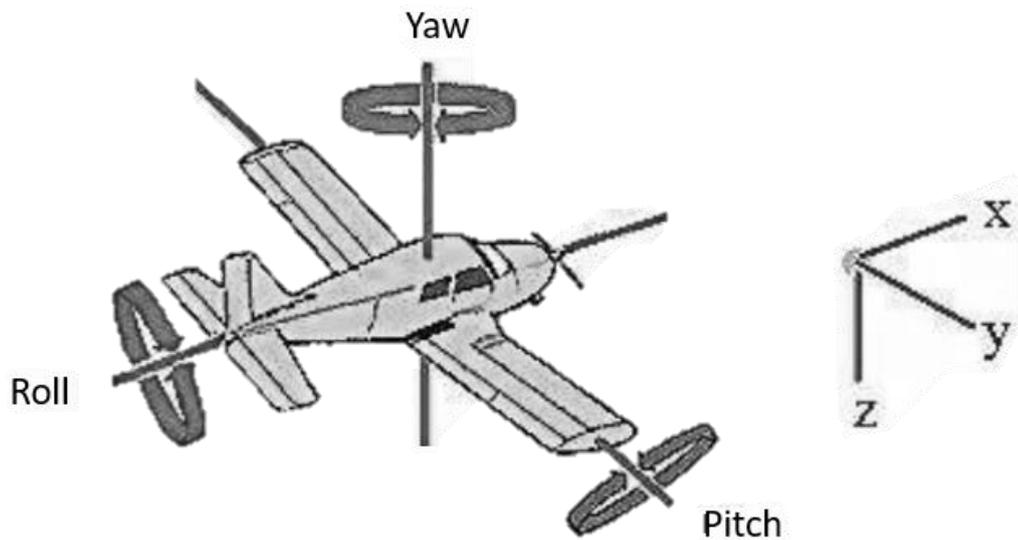
$$E = P \cdot t \quad (12)$$

4.1 BLOCOS INTERNOS DO VANT PF2

Para ilustrar as direções de rotação nos eixos das aeronaves, pode-se observar a Figura 21. Elas também podem ser vistas como os graus de liberdade da aeronave.

⁶ Descarga da bateria de modo a respeitar os limites projetados para uma vida útil de ciclos de carga e descarga recomendados pelo fabricante.

Figura 21 – Direções de rotação de uma aeronave



Fonte: Sampaio (2006).

O VANT utilizado neste projeto é conhecido na PixForce como PF2 e funciona basicamente com os blocos lógicos internos:

- Um par, associado em paralelo, de baterias de LiPo⁷ de 5Ah de capacidade, 35C (C é a constante de descarga, se multiplicada pela capacidade, tem-se a corrente de descarga projetada para operação) e 4 células cada, ou seja, 14,8V de tensão nominal à meia carga e 16,8V em carga completa. O que também significa que cada uma delas pode ser carregada com 5A e descarregada a 175A (na configuração paralelo as correntes se somam e os valores ficam multiplicados por dois), de forma a preservar a sua vida útil (valores para operação contínua). O valor de energia elétrica que pode ser entregue pelo par em uma descarga controlada é de 148W.h, pela Equação (11);

⁷ Polímero de lítio.

Figura 22 – Bateria LiPo 5Ah



Fonte: Do autor (2016).

- Controlador de voo Pixhawk® responsável por dar os sinais das superfícies de controle da aeronave, pela leitura e processamento das variáveis de medida, além de enviar dados para uma estação base por um sistema de comunicação sem fio (telemetria);

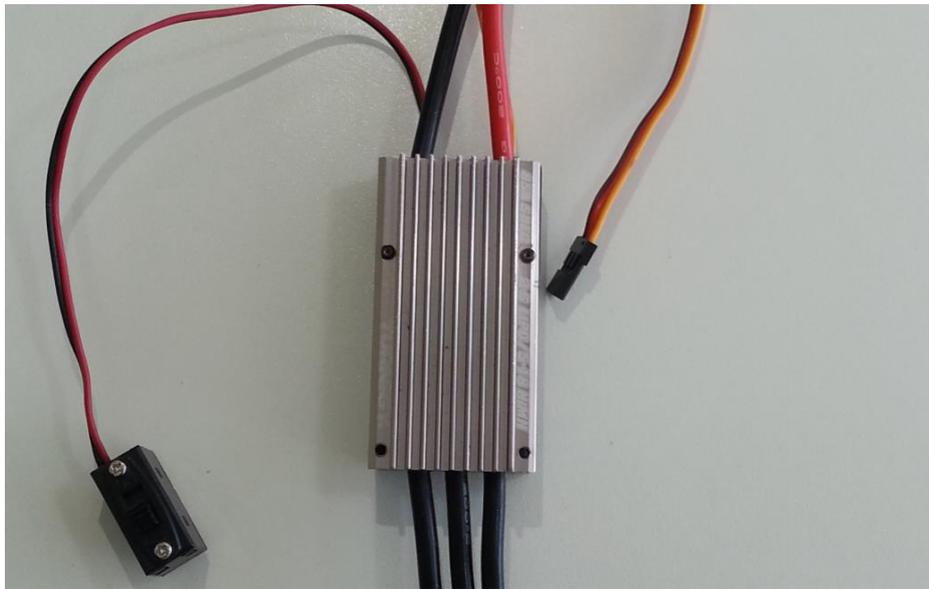
Figura 23 – Controlador de voo



Fonte: Do autor (2016).

- ESC (*electronic speed controller*), recebe o sinal para o controle de potência do controlador de voo e energia por um barramento de potência em corrente contínua da bateria, é o responsável pelo acionamento elétrico do moto;

Figura 24 – ESC 85A



Fonte: Do autor (2016).

- Motor elétrico de passo do tipo *Outrunner*, no qual o rotor é externo ao estator e possui ímãs permanentes de terras raras. É responsável pela propulsão da aeronave no plano horizontal;

Figura 25 – Motor *outrunner*

Fonte: Do autor (2016).

- Servos motores que controlam a posição dos *elevons* (combinação entre *aileron* – usado para o *roll* – e *elevator* – usado para o *pitch* – que são as superfícies de controle da aeronave) para direcionar o VANT nos eixos desejados;

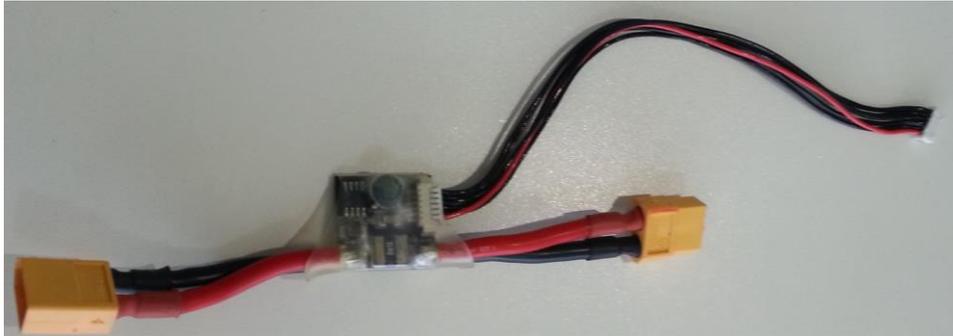
Figura 26 – Servo motor



Fonte: Do autor (2016).

- Módulo de sensores de tensão e corrente que passam pelo barramento de potência, conhecido por *Power Module* (PM);

Figura 27 – Power Module



Fonte: Do autor (2016).

- Telemetria, conhecido como rádio; é responsável pela comunicação sem fio entre o controlador de voo e a estação base. No caso, é um sistema duplo que funciona em duas faixas de frequência: uma em 2,4GHz e pode ser conectada a um computador e geralmente é utilizada para leitura de sensores, envio de missões e configurações dos parâmetros da aeronave; outra em 915MHz é conectada a um controle remoto, com o qual o piloto conduz o VANT;

Figura 28 – Telemetrias



Fonte: Do autor (2016).

Figura 29 – Estação base e controle remoto



Fonte: Do autor (2016).

- GPS: sistema de posicionamento global (do inglês, *global positioning system*). Ele gera informações de posicionamento em 3 dimensões (latitude, longitude e altitude), tempo e, conseqüentemente, velocidade de um ponto na superfície terrestre ao usuário. As informações são obtidas com o auxílio de satélites orbitais dispostos de forma que um usuário em qualquer ponto da superfície terrestre tenha 6 deles visíveis (MEDEIROS, 2007). No mesmo encapsulamento está um sensor de campo magnético, ou seja, uma bússola;

Figura 30 – GPS e bússola

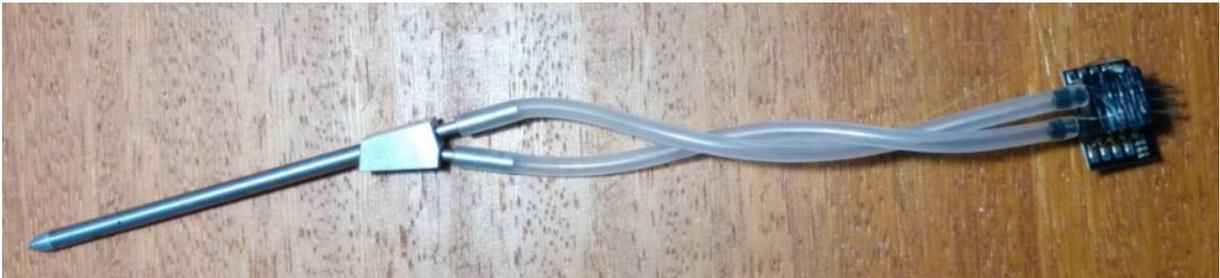


Fonte: Do autor (2016).

- Sensor de velocidade relativa ao ar: composto por uma parte mecânica e uma parte elétrica, o sensor fornece a velocidade relativa ao ar da aeronave. A parte mecânica é conhecida por *pitot*, um tubo com dois canais e orifícios dispostos ortogonalmente entre si; a parte elétrica constitui de dois sensores de pressão (um para cada terminal de tubo

do *pitot*) e um circuito de condicionamento do sinal para fornecer uma saída digital para o controlador.

Figura 31 – Sistema de medição da velocidade relativa ao ar



Fonte: Do autor (2016).

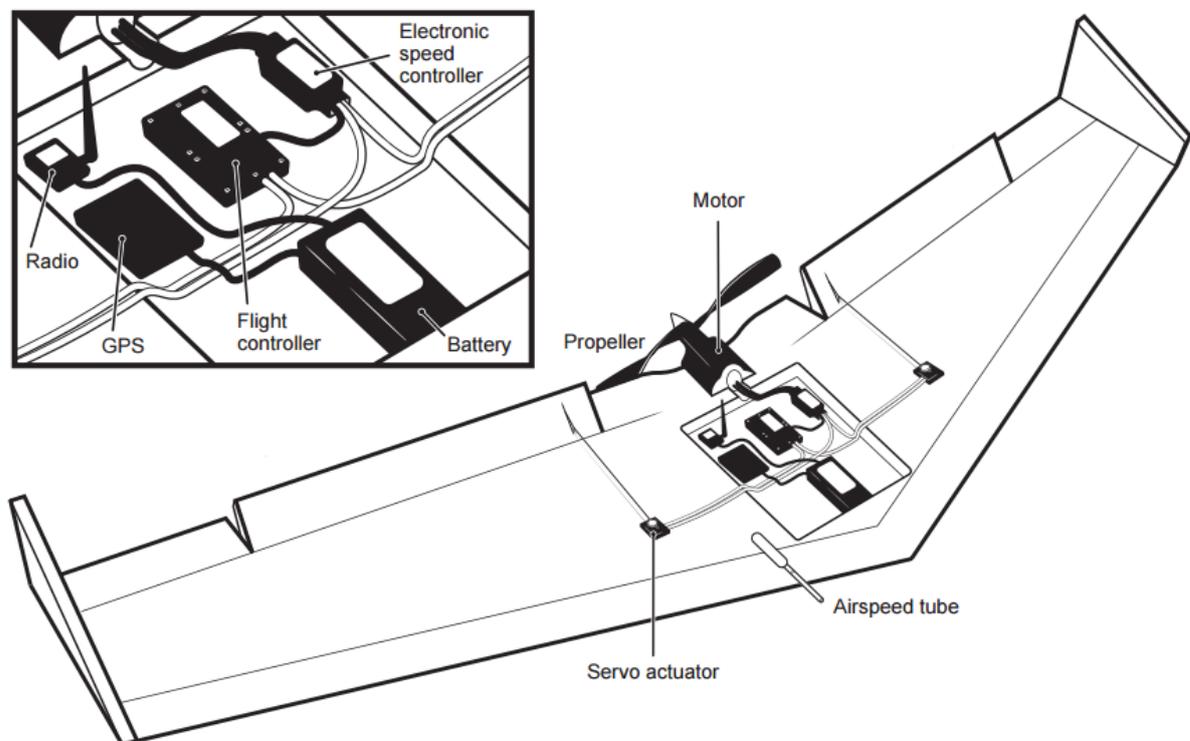
Para atuar no controle e possibilitar os desejáveis voos autônomos, utiliza-se o Pixhawk® da 3DRobotics. Ele trabalha com frequência de amostragem do PM igual a 10Hz, ou seja, ele coleta 10 amostras de corrente e tensão elétricas por segundo. Pode ser resumido como um avançado controlador de voo equipado com:

- Processador de 32bits STM32F427, e um co-processador de 32 bits STM32F103 utilizado em caso de falhas no processador;
- Sensores em 4 circuitos integrados: L3GD20 com giroscópios em 3 eixos sensíveis à velocidade angular; LSM303D com acelerômetros e magnetômetros sensíveis a aceleração e campo magnético nas 3 dimensões de espaço; MPU 6000 equipado com giroscópios em 3 eixos e com acelerômetros em 3 eixos com um processador digital interno; MS5611 com sensores de pressão atmosférica, mais conhecido como barômetro;
- Interfaces: Portas seriais UART, alimentação, DSM, Futaba S.BUS®, PPM, I2C, SPI, microUSB, entre outras.

Como podemos ver há redundância nos circuitos de medições, o que é muito importante no projeto de uma aeronave seja ela tripulada ou não. No caso de uma falha ocorrer e não houver um sistema redundante, as consequências seriam catastróficas.

Para exemplificar um modelo semelhante ao do PF2, podemos olhar para a Figura 32. Uma asa fixa é controlada por um controlador de voo, o qual envia sinais de comando para os atuadores (servos) das superfícies de comando; um conjunto motor/hélice é responsável pela propulsão da aeronave e acionado por um módulo controlador de velocidade, o ESC. O controlador de voo conta com sensores externos (GPS, pitot) e internos (giroscópios, barômetros e acelerômetros).

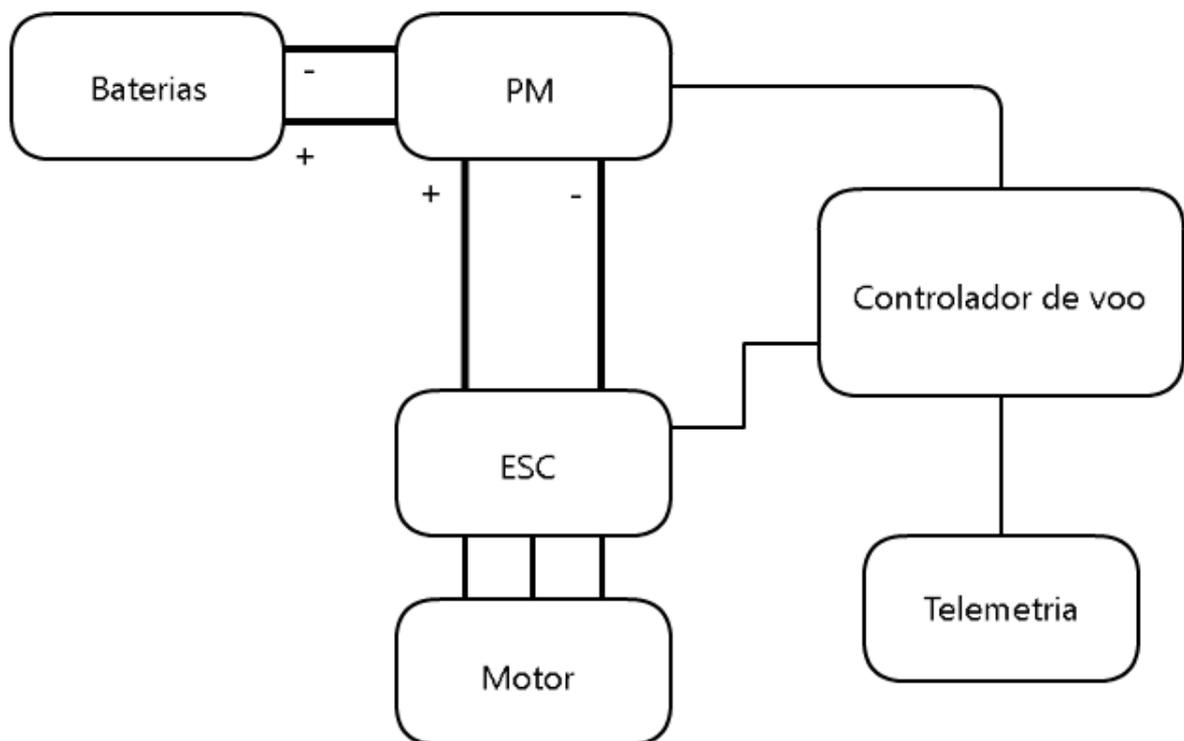
Figura 32 – Exemplo de configuração interna dos blocos de uma asa fixa



Fonte: Kakaes (2015, imagem digital).

Para entender como a aplicação será realizada, é possível observar o esquema da Figura 33, com os blocos internos do PF2. O GPS, o sensor de velocidade relativa ao ar e os servos motores não foram representados por não apresentarem relevância significativa ao estudo energético em realização.

Figura 33 – Blocos de funcionamento interno do VANT antes da aplicação do sistema fotovoltaico



Fonte: Do autor (2016).

As linhas mais espessas representam o barramento de potência da aeronave e é constituído de cabos e conectores projetados para mais de 85A de corrente elétrica. O ESC utilizado também é projetado para trabalhar com corrente em operações contínuas de até 85A. As linhas mais finas representam os fios de comunicação entre módulos, como a linha entre o ESC e o controlador de voo: o controlador de voo manda um sinal em PWM – com informação de velocidade desejada de rotação do motor – para o ESC, o qual aciona o motor. O PM envia sinais para o controlador de

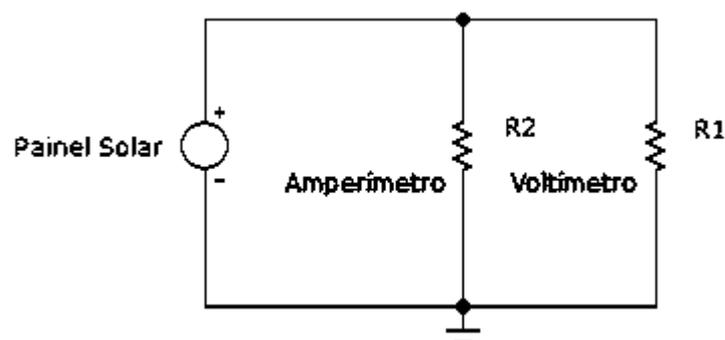
voos referentes às medidas de tensão e corrente realizadas no barramento; o controlador de voo transmite esse e outros sinais para a estação base por meio da telemetria, também representada na Figura 33.

4.2 ESCOLHA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO MECÂNICA DAS CÉLULAS SOLARES

Como o fabricante informa, as células fotovoltaicas escolhidas apresentam uma fragilidade elevada ao toque e degradam ao serem utilizadas se não houver proteção para tal. Com o intuito de proteger mecanicamente as células foto-geradoras, foram escolhidos, de 2 fabricantes, papéis adesivos transparentes (ao menos no espectro visível).

Com o objetivo de escolher o papel que apresente a menor perda de potência de radiação solar entre as opções disponíveis, foi montado um experimento de duas medidas completamente aleatórias em cada uma das três células do experimento: uma sem a proteção e cada uma das outras duas, com um papel de cada fabricante adquiridos. As células foram instaladas sobre a mesma superfície – para estarem expostas às mesmas condições de irradiação de potência luminosa – e montadas de acordo com o esquema da Figura 34.

Figura 34 – Circuito representativo do experimento da escolha da proteção mecânica



O painel solar pode ser modelado como uma fonte de tensão elétrica constante. Um amperímetro apresenta uma impedância interna, a qual pode ser modelada como uma resistência elétrica R_2 . Um voltímetro apresenta uma impedância interna, modelada (da mesma forma) por R_1 , onde $R_1 \gg R_2$ (R_1 é muito maior que R_2). Então, pode se aproximar que toda a corrente fornecida pelo painel solar flui por R_2 e é medida pelo amperímetro. E o voltímetro irá medir a tensão elétrica da fonte ideal de tensão. A fotografia da Figura 35 mostra a estrutura montada para o experimento em questão.

Figura 35 – Foto da estrutura montada para o experimento da escolha da proteção mecânica



Fonte: Do autor (2016).

4.3 APLICAÇÃO DO SISTEMA NA AERONAVE

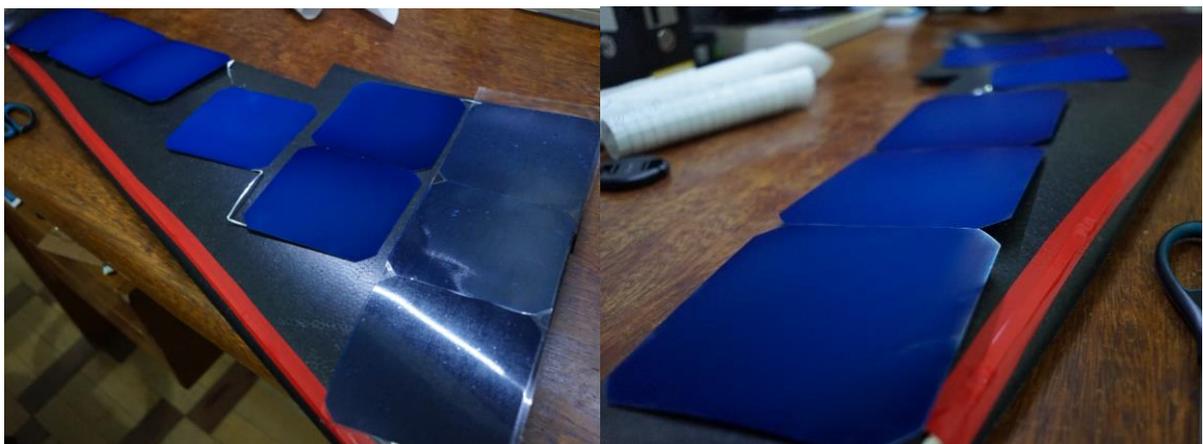
Vinte e uma células foram soldadas e coladas na superfície superior da aeronave como pode ser visto na Figura 36, somando $0,328 \text{ m}^2$, que representa aproximadamente 41% da área disponível. Nove células em cada asa mais 3 células no

corpo do avião foram fixadas e protegidas mecanicamente com um papel adesivo incolor.

O conversor CC-CC escolhido é projetado para uma faixa de entrada de tensão elétrica entre 10 e 32 Volts. Também é sabido que cada célula apresenta um máximo de tensão elétrica de 0,682 V e 0,574 V de tensão de operação, no STC. Então, para fornecer a tensão de entrada do conversor, foi escolhido um esquema de conexões do tipo série entre as células, para formar um painel com tensão máxima de 14,32 V e tensão de operação de 12,05 volts, ambos dentro da faixa de operação do conversor. Sendo que em uma associação do tipo série entre cada célula, a corrente resultante do conjunto é a mesma, já que estão todas no mesmo ramo; e a tensão elétrica resultante é igual à soma das tensões elétricas de cada uma das células.

Na sequência, o sistema de proteção mecânica é aplicado sobre toda a superfície das células. Sendo ele, um papel adesivo transparente e escolhido de acordo com os resultados experimentais apresentados na Seção 5.1.

Figura 36 – Fotos da montagem dos painéis na estrutura



Fonte: Do autor (2016).

A ideia se sustenta na aplicação do sistema fotovoltaico em paralelo com o barramento entre o PM e o ESC da aeronave. Como é possível visualizar na Figura 39. Desta forma, o valor lido pelo PM será referente a energia desprendida pela bateria apenas, dando à estação base informações sobre a quantidade restante de carga nas baterias. Isso tudo porque o projeto leva em consideração trabalhos futuros nos quais todo o sistema será levado a bordo de voos, e com a aeronave no ar a informação que é relevante não é o quanto foi gasto pelo sistema, mas sim o quanto de energia ainda resta nas baterias para a realização de um pouso seguro.

Em paralelo com a entrada do conversor boost (terminais do arranjo), são colocados super capacitores para estabilizar grandes variações temporais de tensão elétrica que podem surgir devido a perturbações externas, como uma nuvem ou qualquer outro objeto que bloqueie o sol, ou até mesmo uma rápida transação de angulação da aeronave devido a uma manobra que esteja sendo realizada. Os capacitores além de atuarem contra esta variação abrupta de tensão, armazenam energia que pode ser aproveitada em intervalos de baixa potência luminosa. Os capacitores utilizados no projeto aparecem na Figura 37; eles foram escolhidos de acordo com a disponibilidade do mercado nacional. Têm capacitância nominal de 4.0F e limite de tensão igual a 5.5V, sendo assim necessária uma associação do tipo série entre – ao menos – 3 deles para operar na faixa de tensão do projeto: de 10 a 14,32 Volts.

Como é de praxe, diodos de potência são utilizados para baypass⁸ de painéis que possam estar interrompendo o fluxo de corrente elétrica fornecido por painéis operacionais naquele instante. Assim, caso algum conjunto de células interromper a corrente elétrica por alguma pane, o sistema não estará completamente fora de operação, já que os diodos nessas condições estarão conduzindo corrente. Os diodos escolhidos são do modelo 6A8, com limite de corrente de operação contínua de 6A.

⁸ Evitar alguma coisa contornando-a (tradução do autor de Cambridge Dictionary).

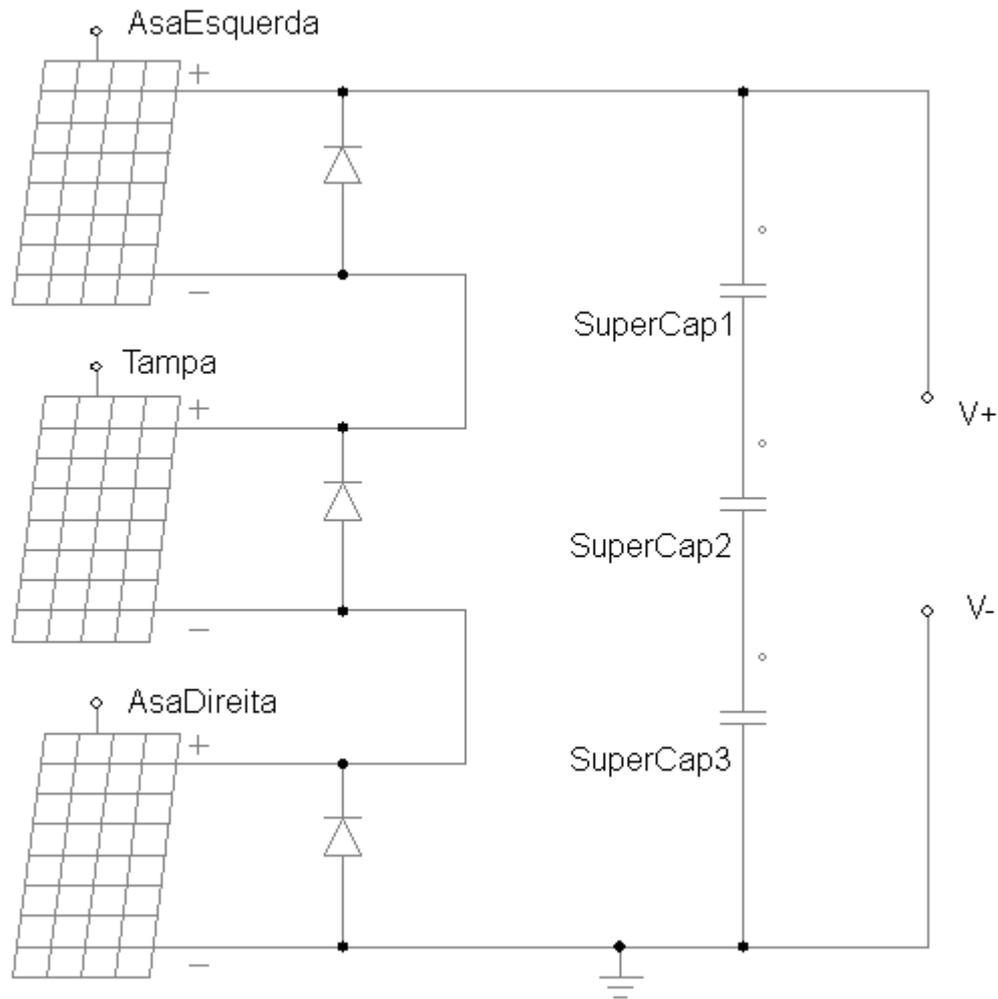
Figura 37 – Super capacitores



Fonte: Do autor (2016).

Um esquema do sistema fotovoltaico foi desenhado e pode ser visualizado na Figura 38. Como citado anteriormente, foram associadas 9 células em série em cada uma das asas e 3 células – também em série – na tampa do corpo central do drone. Os terminais V+ e V- são conectados à entrada do conversor boost adquirido, de acordo com a Figura 39.

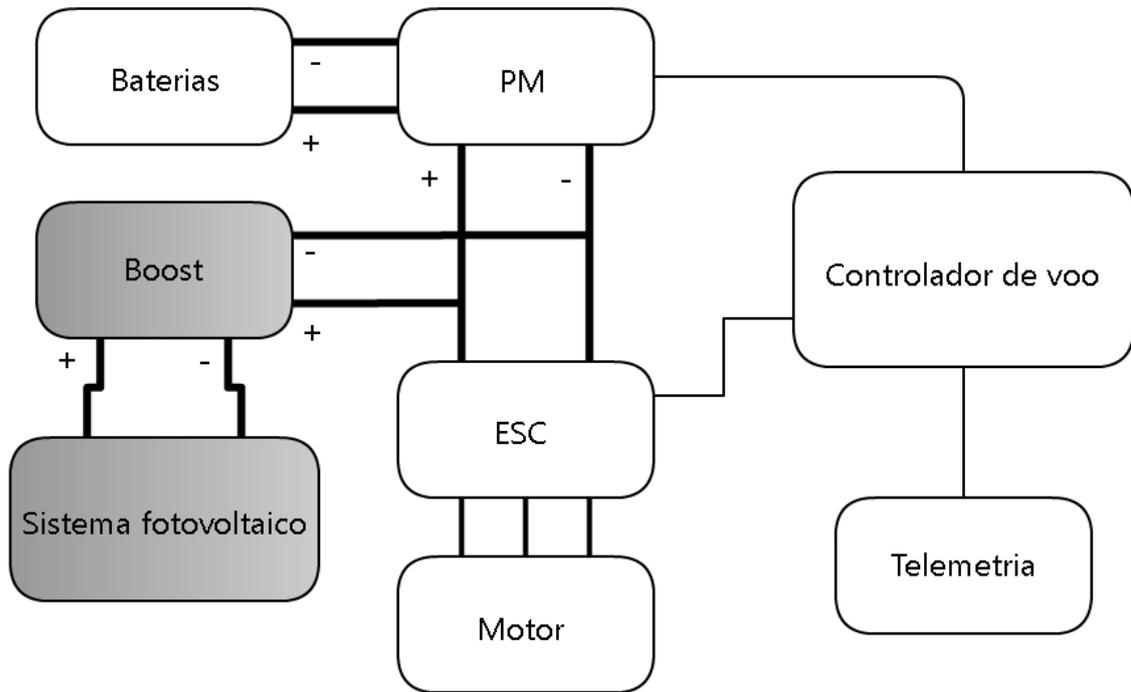
Figura 38 – Sistema fotovoltaico



Fonte: Do autor (2016).

Após a montagem do sistema fotovoltaico e feitas as conexões com o conversor, a saída do boost é conectada ao barramento interno do PF2. A Figura 39 mostra como fica o esquema interno da aeronave após a aplicação do sistema fotovoltaico.

Figura 39 – Blocos de funcionamento interno do VANT depois da aplicação do sistema fotovoltaico



Fonte: Do autor (2016).

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 SISTEMA DE PROTEÇÃO MECÂNICA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Foram realizadas medidas em cada uma das células montadas sobre a mesma superfície conforme descrito na Seção 4.2 e registrados os valores na Tabela 2. Os valores lidos são de tensão e corrente elétrica, e o experimento foi realizado com duas repetições e de forma completamente aleatória. Os valores de potência média foram calculados com a Equação (13).

$$P = V \cdot i \quad (13)$$

Sendo P a potência real desejada, V a tensão elétrica e i a corrente elétrica. Os valores de corrente e tensão são a média aritmética simples das medidas realizadas.

Tabela 2 – Dados do experimento para escolha da proteção adesiva a ser utilizada

	Com proteção adesiva #1		Com proteção adesiva #2		Sem proteção adesiva	
	I[A]	V[mV]	I[A]	V[mV]	I[A]	V[mV]
1ª medida	1,56	620	1,47	602	1,49	603
2ª medida	1,51	606	1,48	597	1,51	591
Média da Potência [mW]	941		884		895	

Fonte: do autor (2016).

Sendo a proteção adesiva #1 é a Plasticover® e a proteção adesiva #2 é a ContactOriginal®. Podemos observar que no caso sem a proteção utilizada, a potência média é menor que no caso com a proteção adesiva #1; fato que nos leva a concluir que o processo de produção das células apresentou uma variabilidade do parâmetro potência elétrica maior que a perda de potência devido à aplicação do sistema de proteção escolhido.

Desta forma, a escolha foi realizada pelo custo financeiro relacionado. A proteção adesiva escolhida foi a do fabricante Plasticover®.

5.2 TESTES DE POTÊNCIA DO SISTEMA

5.2.1 Sem o sistema fotovoltaico

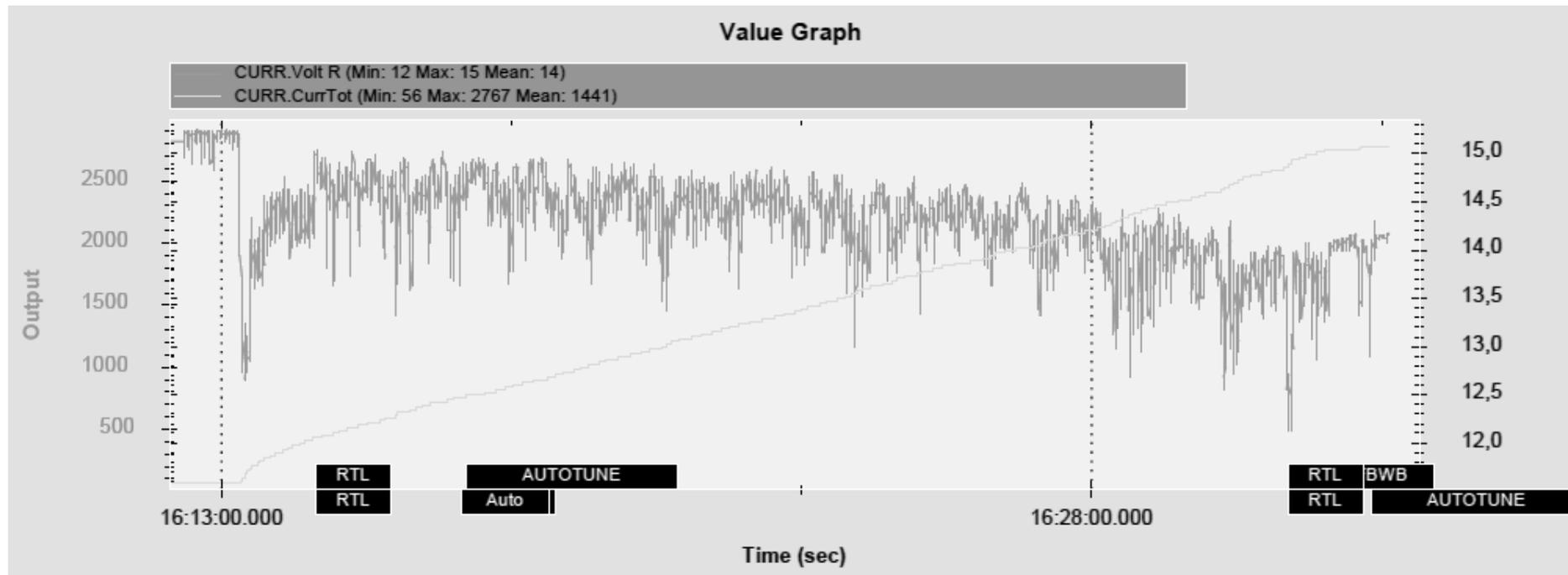
Para adquirir dados, com o PM, da potência fornecida apenas pelo sistema fotogerador, foram realizados testes em solo, com o sistema fotovoltaico no lugar das baterias. Isso porque o PM não mede corrente bidireccionalmente, então se fosse ligado da forma descrita, não mediria o quanto de energia o sistema estaria fornecendo. No primeiro teste de solo (teste 1), então, não havia baterias para serem carregadas, apenas o próprio sistema de propulsão foi acionado de forma a criar a maior carga possível em solo.

Mesmo sabendo que no ar as condições de arrasto do motor são outras, testes de solo são necessários para obter uma estimativa inicial do comportamento do sistema. Idealmente, um túnel de vento seria utilizado, no entanto os custos não justificam tal medida. Isso sem mencionar que tal túnel de vento também deveria simular a radiação solar de forma controlável para se obter medidas coerentes com um voo real.

Dados de voos reais com o drone antes da aplicação dos sistemas fotovoltaicos podem ser observados na Figura 40. Nela podemos ver em cinza escuro uma curva sobreposta significativamente de ruído da leitura de tensão do barramento bateria/motor, pelo PM. A curva crescente em cinza claro mostra o consumo energético em mAh, ou seja, quantos mili Ampères foram entregues em uma hora naquelas condições de tensão. Alguns fatos e conclusões, os quais podem ser observados ao olhar para a figura em questão:

- Os indicadores na barra inferior do gráfico indicam os modos de voo utilizados naqueles instantes, como RTL (*Return to launch*) com o qual o VANT sobrevoa o ponto onde foi ligado em círculos; Auto, com o qual o VANT realiza uma missão pré-definida pelo usuário na estação base; AUTOTUNE, um modo que o controlador utiliza para usar os dados de todos os sensores e calibrar parâmetros internos (como os ganhos dos controladores proporcional, integral e derivativo de cada um dos graus de liberdade da aeronave);
- Os valores de tensão observados têm relação direta com a carga na bateria, ou seja, a rotação conjunto de maior consumo energético na aeronave, o conjunto de propulsão: motor e hélices. Exemplo a primeira grande queda de tensão até aproximadamente 12,5 V que ocorre no instante em que a aeronave realiza o lançamento e necessita de grande potência para ganhar altitude. Na curva de corrente fica mais sutil, mas também é possível observar estas questões: nos vales de tensão ocorrem os pontos de maior derivada da função;
- Nos primeiros 15 minutos de voo, a aeronave consumiu aproximadamente 2000mAh, ou 2Ah. Lembrando que havia 2 baterias de 5Ah cada. Numa projeção linear simples, a autonomia da aeronave vale aproximadamente 5 vezes os 15 minutos, ou seja, 1 hora e 15 minutos.

Figura 40 – Dados de um voo sem o sistema fotovoltaico



Fonte: Do autor (2016).

Ao posicionar o ponteiro sobre a curva no MissionPlanner⁹ é possível ler os dados de um ponto de interesse, desta forma foram realizadas algumas anotações de valores para o cálculo do somatório de corrente que passou pelo PM. Exportando os dados do log (arquivo gerado pelo controlador de voo que contém informações de todos os sensores durante o tempo que o controlador de voo permaneceu ligado) do avião para uma planilha de cálculos, podemos encontrar o valor médio de tensão elétrica fornecido pelo sistema fotogerador no período. Chegou-se à média de 14,15V e 7991,2mA, resultando uma média de 113,08W pela Equação (13) no período amostrado. Para esse caso, foram amostrados dados em um intervalo de 15 minutos numa frequência de amostragem de 10Hz, ou seja, foram coletados 9000 valores de tensão e corrente elétricas.

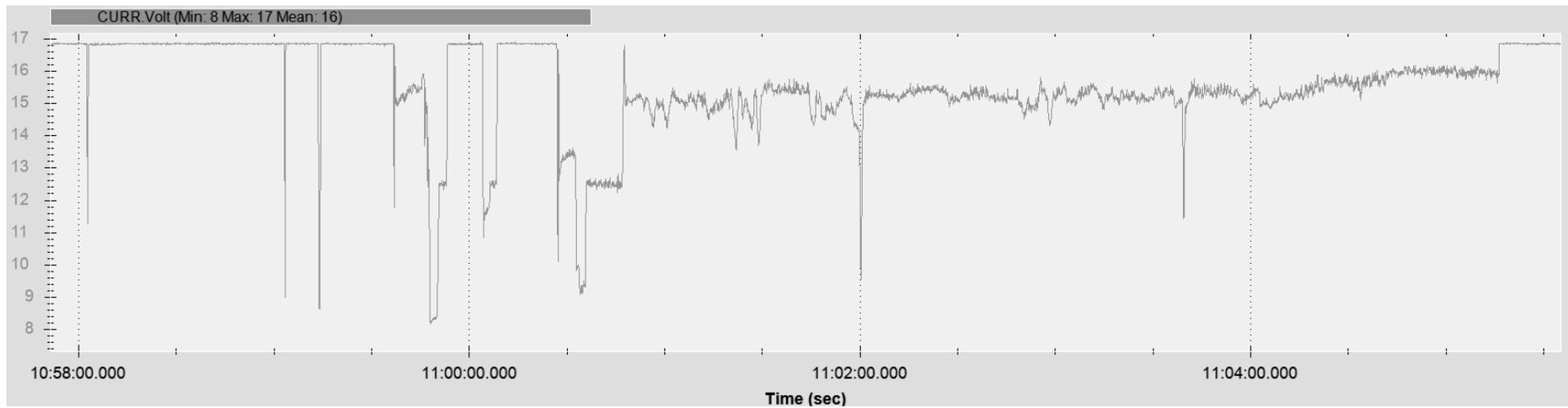
5.2.2 Com o sistema fotovoltaico

Ao ligar todo o equipamento – incluindo o sistema fotogerador – em um dia ensolarado, foram adquiridos os dados de tensão elétrica da Figura 41 e da integral da corrente elétrica no tempo da Figura 42. O intervalo para as medidas foi escolhido para um percentual constante de rotação do motor desejado pelo controlador de voo, que foi definido pelo controle remoto (da estação base) e vale 15% da rotação máxima do sistema de propulsão. Esse valor foi escolhido por ser o maior valor de rotação com os quais os efeitos das não idealidades do sistema fotogerador se pronunciavam a ponto de rebaixar a tensão nos terminais e desligar o controlador de voo.

Vale ressaltar também que o consumo energético da aeronave é constituído basicamente do sistema propulsor e tem relação direta com o percentual de rotação do motor/hélice. Em outras palavras, quanto mais rápido o motor e a hélice giram, maior é o consumo de energia do sistema.

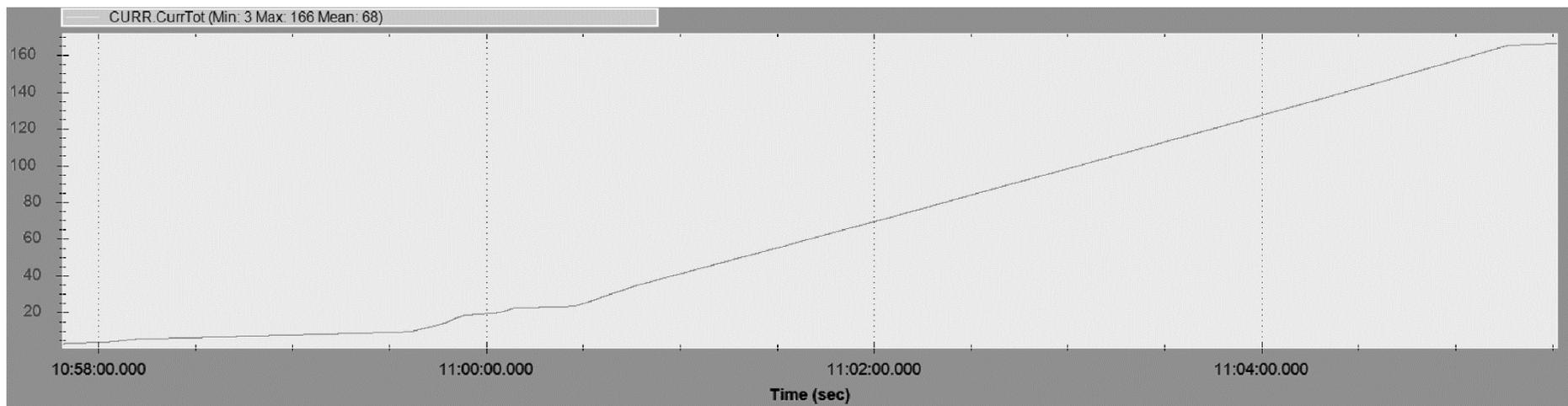
⁹ Software para acesso ao controlador de voo pela estação base.

Figura 41 – Tensão elétrica do teste 1



Fonte: Do autor (2016).

Figura 42 – Integral da corrente elétrica no teste 1



Fonte: Do autor (2016).

Exportando os novos dados para uma planilha de cálculos, foram encontrados os valores médios de tensão e corrente elétricas no período. Lembrando que os dados desse teste foram amostrados num intervalo de 4 minutos numa frequência de amostragem de 10Hz, ou seja, foram coletados 2400 valores de tensão e corrente elétricas. Chegou-se à média de 15,25V e 1739,4mA, resultando uma média de 26,52W pela Equação (13) no período amostrado.

5.2.3 Comparativo entre os casos sem e com o sistema fotovoltaico

Para melhor visualizar os parâmetros de interesse do projeto, foram reunidos na Tabela 3, os valores das medidas descritas nas Seções 5.2.1 e 5.2.2. Lembrando que os valores de corrente e tensão elétricas são valores médios obtidos no período de amostragem de cada teste e a potência elétrica foi obtida com a Equação (13).

Tabela 3 – Comparativo entre os testes

	Sem a aplicação (potência demandada)	Com a aplicação (testes sem as baterias)
Tensão [V]	14,15	15,25
Corrente [mA]	7991,2	1739,4
Potência [W]	113,08	26,52

Fonte: do autor (2016).

A característica mais desejável na implementação do projeto é a autonomia do VANT. A Tabela 3 contém informações necessárias para se obter uma estimativa de quanto o sistema aplicado influenciou o parâmetro referente à autonomia. Apesar de ter conhecimento da complexa influência que essa aplicação gera em todos os parâmetros energéticos da aeronave. Para os cálculos realizados nesse trabalho, não

são considerados os gastos energéticos extras devido a massa do sistema que está sendo aplicado, no entanto é sabido que a massa total do sistema embarcado tem relação com o consumo de energia do sistema propulsor.

Lembrando que, da Seção 4.1, o par de baterias é capaz de fornecer 148W.h em uma descarga controlada. Subtraindo o valor de potência que a aeronave consome em voo pela potência que o sistema fotovoltaico forneceu nos testes, temos um saldo de potência após a aplicação, que pode ser visto como a potência média que o conjunto de baterias deverá fornecer para o drone permanecer voando, e vale 87,25W. Se substituirmos esses valores na Equação (12), chegamos à estimativa do tempo necessário para descarregar o par de baterias de forma controlada em condições reais de voo; esta estimativa é de 1,7 horas ou 1 hora e 42 minutos, ou seja, um acréscimo de aproximadamente 27 minutos de autonomia. Para o valor percentual da estimativa de ganho de tempo em voo $G_{\%}$, podemos utilizar a Equação (14), onde t_d é o tempo estimado de duração após a aplicação do sistema fotovoltaico e t_a é o tempo calculado da autonomia da aeronave no ar. Chegamos, enfim, ao ganho percentual da autonomia após a aplicação do sistema de 35,7% de tempo.

$$G_{\%} = \frac{t_d - t_a}{t_a} \cdot 100 \quad (14)$$

6 CONCLUSÃO

Ao longo da construção do projeto do estudo e desenvolvimento da aplicação de um sistema fotovoltaico em drones, ficou clara a preocupação com a otimização da conversão de energia solar para elétrica. Para isso, foram pensadas diversas formas de disposição das células fotogeradoras, com o intuito de melhor aproveitar a área disponível da aeronave. Além da escolha das próprias células solares entre as tantas disponíveis, a qual teve relação com parâmetros não apenas relacionados com a geometria e flexibilidade, mas também com a eficiência da conversão de energia.

Surgiu também, a necessidade de um circuito de regulação de tensão do sistema fotovoltaico devido a variação (no tempo) de tal parâmetro dos painéis solares. O circuito deveria ser um conversor de potência elevador de tensão, porque um conversor de potência é capaz de regular a tensão elétrica com perdas de energia menores que outros sistemas de regulação, e porque a tensão elétrica na saída do conjunto fotovoltaico resultante era menor que a tensão elétrica do sistema interno do VANT utilizado. Viu-se também a importância da utilização de métodos de MPPT na implementação do circuito de controle responsável pelo acionamento da chave do conversor de potência, não obstante não foi viável a aplicação devido a indisponibilidade no mercado nacional de algum que se adequasse às especificações do projeto. Foi escolhido um módulo conversor de potência CC-CC do tipo boost elevador de tensão, por melhor se adequar às características desejáveis da aplicação; associado com os painéis fotovoltaicos e com outros componentes elétricos, resultou em um sistema fotogerador, o qual pôde ser aplicado no circuito tradicional do drone escolhido.

Ao término da montagem, foram realizadas medidas no sistema e comparadas com medidas anteriores à aplicação. A potência média fornecida em voo sem o sistema fotogerador aplicada fornecida pelo conjunto de baterias foi de 113,08W; já em testes de solo com o sistema fotovoltaico aplicado e sem as baterias conectadas chegou-se a média de 26,52W de potência elétrica. Ao final, estimou-se um aumento de 27

minutos de autonomia, representando 35,7% em relação à 1 hora e 15 minutos referentes a autonomia anterior à aplicação do painel resultante – mesmo utilizando apenas 41% da área disponível da aeronave, devido à geometria.

Caso o sistema fotovoltaico fosse aplicado em algum modelo de VANT com uma geometria que permita o melhor aproveitamento da área disponível, o ganho de autonomia seria maior. Além disso, ficam também sugestões para trabalhos futuros relacionados, a utilização de um circuito de controle com algum método de MPPT para o controle da chave do conversor de potência empregado, com intensão de aproveitar o máximo de energia que o conjunto fotogerador pode entregar ao sistema interno. Sem dúvidas que, ao aumentar o número de células utilizadas, o estudo de qual conversor a ser utilizado deve ser refeito com os novos parâmetros de tensão e corrente elétricas resultantes do novo painel. Outra análise que pode ser realizada para complementar é a quantificação do ganho de autonomia do sistema, não apenas estimando um valor com os dados de testes em solo, mas uma análise estatística baseada em vários ciclos de descarga das baterias em pleno voo sem e com o sistema fotogerador aplicado; dessa forma a confiabilidade da característica de autonomia seria maior.

REFERÊNCIAS

ADAMS, W.; DAY, R. The action of light on selenium. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, n. 25, p. 113-117, pub. 1 Jan. 1876. Disponível em: <<http://rspl.royalsocietypublishing.org/content/25/171-178/113.full.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2016.

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO. **Proposta de instrução suplementar, intitulada “emissão de certificado de autorização de voo experimental para sistemas de veículo aéreo não tripulado”**, 2012. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/transparencia/consulta2012/01/Justificativa.pdf>>. Acesso em: 8 set. 2016.

ANDERSON, D.; EBERHARDT, B. How airplanes fly: A Physical Description of Lift C. **Sport Aviation**. Feb. 1999. Disponível em; <<http://cospilot.com/documents/Lift.pdf>>. Acesso em 26 set. 2016.

BOEING. **Boeing Phantom Ray Completes 1st Flight**, 3 May 2011. St. Louis. Disponível em: <<http://boeing.mediaroom.com/2011-05-03-Boeing-Phantom-Ray-Completes-1st-Flight>>. Acesso em: 27 set. 2016.

BRITO, M. Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade. **O instalador**, jul. 2006. 7 p. Artigo – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/i1.pdf>>. Acesso em 30 out. 2016.

CAMBRIDGE DICTIONARY. Disponível em: <<http://dictionary.cambridge.org/us/dictionary/english/>>. Acesso em: 4 nov. 2016.

CASARO, M. Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação. **Eletrônica de Potência**, v. 13, n. 3, 3 ago. 2008. Disponível em: <<http://www.dee.ufrj.br/FAE/download/rvol13no3p2.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2016.

COELHO, R. **Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos**. 2008, 176 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/91051>>. Acesso em: 13 set. 2016.

CONVERSORES CC-CC. Notas de aula, Disciplina: Aplicações da Eletrônica de Potência. Professor Fausto L. Bastos. Semestre 2, 2014.

CORRÊA, R. **Implementação de um controle de missões para Veículos Aéreos Não-Tripulados utilizando a plataforma Raspberry Pi**, 2016. 88 p. Monografia

(Graduação) – Curso de Engenharia de Computação, UFRGS, Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/147667>>. Acesso em: 16 set. 2016.

DELAIR-TECH. **6DT18** – Long range mini UAV, smart and strong. Disponível em: <<http://www.delair-tech.com/uav-dt18/>>. Acesso em: 28 out. 2016.

DJI. **Spreading Wings. S1000+** – Your DSLR in Flight. Disponível em: <<http://www.dji.com/spreading-wings-s1000-plus>>. Acesso em: 28 out. 2016.

EBAY. **Sunpower flexible solar cells diy kit**. Disponível em: <<http://www.ebay.co.uk/itm/38-5x5-SUNPOWER-FLEXIBLE-Solar-Cells-DIY-120-wt-KIT-wires-flux-pen-j-box-solder-/171960401780?hash=item2809a37f74:g:o8QAAOSwAodWFCNb>>. Acesso em: 9 jun. 2016.

GREEN, A. Solar cell efficiency tables: version 16. **Progress in Photovoltaics Research and Applications**, v. 8, n. 4 p. 377-383, July 2000. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/299604397_Solar_cell_efficiency_tables_version_16>. Acesso em: 9 out. 2016.

JENKINS, B. **The economic impact of unmanned aircraft systems integration in the United States**. Association for Unmanned Vehicle Systems International. Mar. 2013. Disponível em: <http://robohub.org/uploads/AUVSI_New_Economic_Report_2013_Full.pdf>. Acesso em: 7 set. 2016.

KAKAES, K. Drones and aerial observation. **New America**, chap. 1, July, 2015 [S.I.]. Disponível em: <<http://drones.newamerica.org/primer/>>. Acesso em: 25 out. 2016.

KONARKA. **Konarka Power Plastic® 20 Series**, Product Specifications. Disponível em: <<http://www.econologie.info/share/partager/1254647073FCWNkM.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2016.

MEDEIROS, F. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**, 2007. 102. P. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), UFSM, Santa Maria, 2007. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/laserg/images/Fabricio_Ardais_Medeiros_Dissertacao.pdf>. Acesso em: 27 out. 2016.

PETRY, C. **Semicondutores aplicados a conversores (MOSFET E IGBT)**, Notas de aula, Disciplina: Eletrônica de Potência. IFSC, Florianópolis, 2012. Disponível em: <http://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Eletronica_Potencia/2012_1/Apresentacao_Aula_12.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2016.

POMILIO, J. **Pré-reguladores de Fator de Potência**, UNICAMP, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Publicação FEE 03/95, rev. e atual. 2016.

Disponível em: <<http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/pfp>>. Acesso em: 2 nov. 2016.

PORTAL ENERGIA. **Principais tipos de células fotovoltaicas constituintes de painéis solares**. 28 nov. 2011. <<http://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituientes-de-paineis-solares/>>. Acesso em 21 out. 2016.

PORTAL SOLAR. **Tipos de painel solar fotovoltaico**. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 21 out. 2016.

PUSCOV, J. **Flight system implementation in UAV**. Examensarbete utfört vid Fysikinstitutionen, KTH, SCFAB, Somaren-Hösten, 2002. 51 p. Disponível em: <<http://documentslide.com/documents/004-fligh-system-implementation-in-a-uav.html>>. Acesso em: 10 set. 2016.

RASHID, M. **Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014. Disponível em: <<http://univates.bv3.digitalpages.com.br/users/publications/9788543005942/pages/-20>>. Acesso em: 10 out. 2016.

RODRIGUES, P. **Sistema de geração e aquisição das características I-V de módulos fotovoltaicos**, 2009. 87 p. Relatório de Projecto – (Mestrado em Engenharia Industrial) – Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança, nov. 2009. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/2027/1/Pedro_Rodrigues_MEI_2009.pdf>. Acesso em: 6 out. 2016.

SAMPAIO, R. **Sistema de controle de atitude embarcado para vôo autônomo de aviões em escala**, 2006. 186 p. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica), UFB, Salvador, 2006. Disponível em: <<ftp://labattmot.ele.ita.br/ele/dsoares/Leitura/Sampaio2006.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2016.

SOLAR FIRST. **Células transparentes**. Disponível em: <<http://www.esolarfirst.com/>>. Acesso em: 20 out. 2016.

SOLAR PANELBUYERS GUIDE. **Panel types crystalline**. Disponível em: <<http://www.solarpanelbuyersguide.co.uk/panel-types-crystalline/>>. Acesso em: 21 out. 2016.

SOLVEFORX. **Project Loon**. Disponível em: <https://www.solveforx.com/intl/pt-BR_br/loon/technology/>. Acesso em: 5 out. 2016.

SUNPOREW. **Maxeon quality cells**. Disponível em: <<https://us.sunpower.com/home-solar/solar-cell-technology-solutions/>>. Acesso em: mar. 2016.

USINAINFO. **Regulador de tensão ajustável**. Disponível em: <<http://www.usinainfo.com.br/fontes-e-reguladores/regulador-de-tensao-ajustavel-carregador-boost-step-up-para-mais-12v-a-35v-10a-100w-3633.html>>. Acesso em: set. 2016.

VILLALVA, M. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2ª ed. rev. e atual. São Paulo: Érica, 2015. 67-71 p.

WALKER, G. **Evaluating MPPT Converter Topologies Using a MatLab Model**, 2001. Artigo – University of Queensland, Australia. Dept of Computer Science and Electrical Engineering. Disponível em: <http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/40044048/00b7d5272c90a3eeb2000000.pdf20151115-68247-1obxry9.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1476858370&Signature=xchlmfzYkpGzzy1r8BfrciE%2FoJw%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DEvaluating_MPPT_converter_topologies_usi.pdf>. Acesso em: 18 out. 2016.

ZUCKERBERG, M. **The technology behind aquila**, 21 Jul. 2016. Disponível em: <https://www.facebook.com/notes/mark-zuckerberg/the-technology-behind-aquila/10153916136506634?_mref=message_bubble>. Acesso em: 27 set. 2016.