

Rui Pedro Rodrigues Baptista

DronePort:
Estação de carga inteligente
para veículos aéreos de descolagem vertical

Master's Dissertation in
Electrical and Computers Engineering

September of 2018

• U • C •



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DronePort:

Estação de carga inteligente
para veículos aéreos de descolagem vertical

Rui Pedro Rodrigues Baptista

September of 2018



DronePort:

Estação de carga inteligente
para veículos aéreos de descolagem vertical

Supervisor:

Lino José Forte Marques

Jury:

Manuel Marques Crisóstomo

Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira

Lino José Forte Marques

Dissertation submitted in partial fulfillment for the degree of Master of Science in
Electrical and Computer Engineering.

September of 2018

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha gratidão e admiração pelo meu orientador Professor Doutor Lino Marques, pelo apoio dado durante o desenvolvimento deste projeto e, acima de tudo, pela sua disponibilidade, sugestões e ensinamentos.

Aos meus pais Carlos e Isabel e ao meu irmão Nuno, agradeço a paciência, o amor e todo o apoio incondicional dado ao longo de todos estes anos. Sem eles não seria possível esta nova etapa.

À minha namorada, Alexandra, agradeço todo o tempo despendido, o apoio permanente e, sobretudo, a compreensão, amizade e amor, que me permitiu superar todas as dificuldades deste longo percurso.

Ao Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra, especialmente aos meus grandes amigos João Palhinha e Hélio Ochoa que foram os meus pilares no decorrer deste projeto.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos os meus familiares e amigos por toda a força e apoio, pelos momentos de lazer e principalmente por acreditarem.

Resumo

Um requisito fundamental para a autonomia energética de um veículo aéreo não tripulado (UAV) é o carregamento de baterias. Este processo é tipicamente supervisionado e controlado por um operador humano. Trata-se de um processo demorado que reduz o alcance operacional do sistema. De entre os clientes de UAVs encontram-se os clientes que usam redes de vigilância que procuram sistemas mais rápidos e autónomos e os clientes comuns que procuram evitar o aborrecimento associado à troca de energia. De forma a satisfazer os requisitos destes clientes é desenvolvido um sistema automatizado de recarga de baterias. Tendo por foco os UAVs de descolagem vertical, é realizada uma análise de vários conceitos que permitem colmatar a deficiência energética, como o uso de um cabo umbilical e plataformas de troca e recarga de baterias. Desta forma, é proposto uma plataforma de recarga de baterias de custo reduzido, autónoma e que possibilite uma variedade de UAVs. A plataforma é constituída por dispositivos de carregamento inteligente, sistemas de alinhamento mecânico, meios de comunicação com UAVs e com interfaces externas e por um sistema de energia fotovoltaica. Para além da plataforma também é proposto um sistema de gestão de baterias assim como a implementação de um sensor de posicionamento eficiente. Como desenvolvimento final, cria-se um software de monitorização para fins de demonstração de resultados. Este desenvolvimento origina resultados precisos e fiáveis, dando origem a um sistema robusto, capaz de albergar UAVs de 450 a 680 mm de diagonal com um peso de 3kg e tendo um custo reduzido, o que permite uma aterragem precisa e com total autonomia energética.

Como trabalho futuro, poderá ser realizado uma estação de carga inteligente incorporando o trabalho já desenvolvido, permitindo assim um aumento da segurança e versatilidade dos UAVs.

Palavras-Chave: Carga de Baterias, Veículo Aéreo Não Tripulado, Posicionamento, Alinhamento Mecânico, Sistema de Gestão de Baterias.

Abstract

The fundamental requirement of the self-sufficient energy for an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is the battery charging. This process is supervised and controlled by a human-operator, which represent a time-consuming process and decrease the operational range of the system. Among the UAV clients are the clients that use surveillance systems looking for faster and autonomous systems and the common clients seeking to avoid the hassle associated to the energy exchange. To achieve the UAV customers requirements is developed an automated battery recharge system. Focus on UAV vertical take-off is realised an analysis of several concepts allowing to rectify the energetic disability, like using an umbilical cord and platforms that allow you to exchange and recharge batteries. For this reason, is proposed a low cost and autonomous battery recharge platform and a platform that enables a variety of UAVs. This platform is composed by smart charging devices, mechanical alignment systems, means of communication with UAVs and external interfaces and by a photovoltaic energy system. In addition, is also proposed a battery management system and an implementation of an efficient positioning sensor. Lastly, is created a monitoring software with a purpose of demonstrating results. This work lead to precise and reliable results, giving rise to a robust system capable of accommodating UAVs from 450 to 680 mm diagonally with a weight of 3kg and with a low-cost price. The mentioned conditions allow a precise landing and full autonomy.

For future work, could be realized a smart charging station incorporating the working already developed. This enables an increase of the security and versatility of the UAVs.

Keywords: Smart Charger, Unmanned Aerial Vehicle, Position Sensor, Mechanical alignment, Battery Management System.

Somos pessoas simples, fazendo coisas Extraordinárias

— Sam Walton,

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Acrónimos	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 Recarga Automática de UAV	5
2.1 Bateria Li-Po	5
2.1.1 Carregamento de uma célula	6
2.1.2 Equilíbrio de células	6
2.2 Cabo Umbilical	11
2.3 Captura de Energia	12
2.4 Troca de Baterias	12
2.5 Plataforma de Carregamento	13
2.6 Conclusões	14
3 Arquitetura do Sistema	19
3.1 Requisitos de Dimensionamento	19

3.2	Arquitetura do DronePort	21
3.2.1	Geração de Energia Elétrica	21
3.2.2	Carregador Inteligente	22
3.2.3	Inversor de Polaridade	24
3.2.4	Sistema de Alinhamento	24
3.2.5	Comunicação	24
3.3	Arquitetura do UAV	25
3.3.1	Sistema de Alimentação	25
3.3.2	Controlo de Movimento	25
4	DronePort	27
4.1	<i>Hardware</i>	27
4.1.1	Sistema de Alinhamento Mecânico	29
4.1.2	Carregador	31
4.1.3	Inversor de Polaridade	32
4.1.4	Comunicação	32
4.1.5	Geração de Energia Elétrica	32
4.2	<i>Software</i>	33
4.2.1	Carregador iMAX B6	34
4.2.2	Regulador de carga BlueSolar	37
4.2.3	Controlador de motor de passo	40
4.2.4	<i>Firmware</i>	41
4.2.5	Comunicação Exterior	46
4.3	<i>Software</i> de Monitorização	48
5	UAV	51
5.1	<i>Hardware</i>	51
5.1.1	Sistema de Gestão de Baterias	52
5.1.2	Transferência de Energia Elétrica	55
5.1.3	Deteção de Estado do UAV	55
5.1.4	Sensores de Aterragem de Precisão	56
5.2	<i>Software</i>	58
5.2.1	Comunicação com o DronePort	60

6	Testes e Resultados	63
6.1	Precisão e alinhamento	63
6.2	Teste de Carregamento	65
7	Conclusão	69
7.1	Trabalhos Futuros	70
	Bibliografia	71
A	Esquemas e PCBs do BMS	77
B	Esquemas e PCBs do Módulo UAV	83
C	Esquemas e PCBs do DroneStation	87
D	Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	95
E	Software de Monitorização	99
F	Desenhos CAD do Protótipo	103

Lista de acrónimos

ADC	Analog to Digital Converter
AGM	Absorbent Glass Mat
BMS	Battery Management System
CRC	Cyclic Redundancy Check
DMA	Direct Memory Access
FIFO	First In, First Out
GPS	Global Positioning System
HAL	Hardware Abstraction Layer
<i>I²C</i>	Inter-Integrated Circuit
IC	Integrated Circuit
ISR	Institute of Systems and Robotics
LIDAR	Light Detection and Ranging
Li-Po	Lithium Polymer
LSB	Least Significant Bit
MCU	Microcontroller Unit
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MSB	Most Significant Bit
OCV	Open Circuit Voltage

PCB	Printed Circuit Board
PV	Painel Fotovoltaico
RPM	Rotações por Minuto
SAM	Sistema de Alinhamento Mecânico
SOC	State-Of-Charge
SOH	State-Of-Health
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

Lista de Figuras

2.1	Estágios da carga de célula Li-Po [6].	7
2.2	Recursos de um BMS [7].	8
2.3	Curva OCV-SOC para diferentes tipos de células. (a) OCV-SOC para células Li-PO4. (b) OCV-SOC para células Li-Po [7].	8
3.1	Esquema da visão geral do sistema	19
3.2	Componentes principais do UAV utilizado.	20
3.3	Arquitetura do DronePort.	22
3.4	Gráfico da extração do ponto de máxima potência de um painel fotovoltaica [43].	23
3.5	Arquitetura do UAV.	23
4.1	Diagrama de interatividade entre módulos.	28
4.2	Esquema do sistema de alinhamento na plataforma.	29
4.3	Esquema elétrico simplificado do IC DRV8825.	30
4.4	Esquema de controlo de um botão do iMAX B6.	31
4.5	Pacote de dados enviado pelo iMAX B6	34
4.6	Legenda dos botões de controlo do carregador iMAX B6	37
4.7	Definição dos identificadores do BlueSolar	38
4.8	Fluxograma da descodificação de mensagens do BlueSolar	39
4.9	Fluxograma da máquina de estados principal do DronePort	42
4.10	Fluxograma da máquina de estado do sistema de alinhamento mecânico.	43
4.11	Fluxograma da máquina de estado do processo de carregamento.	45
4.12	Visão do <i>software</i> - Módulo Geral	49
5.1	Diagrama de aplicação típico do IC ISL94203.	53
5.2	Circuito simplificado de equilíbrio de uma célula.	54

5.3	Contactos metálicos para transferência de energia e sua disposição.	56
5.4	Fluxograma do <i>firmware</i> da primeira sequencia do módulo UAV.	58
5.5	Fluxograma do <i>firmware</i> da segunda sequencia do módulo UAV.	59
5.6	Estrutura do pacote de dados enviado para o pedido 0x30.	61
6.1	(a) Plataforma com base em branco. (b) Plataforma com base em preto. . .	64
6.2	(a) Caixa de proteção do emissor infravermelho versão 1. (b) Caixa de proteção do emissor infravermelho versão 2.	65
6.3	Gráfico de carga a 0.5 C (1.8 A).	66
6.4	Gráfico de carga a 0.8 C (3 A).	66
A.1	Esquema do circuito integrado ISL94203.	78
A.2	Esquema do circuito de equilíbrio do BMS.	79
A.3	Esquema do circuito de potência do BMS.	80
A.4	(a) Desenho da PCB do BMS camada TOP. (b) Desenho da PCB do BMS camada BOTTOM.	81
A.5	PCB do BMS camada TOP	82
B.1	Esquema do circuito de controlo do módulo UAV.	84
B.2	(a) Desenho da PCB do Módulo UAV camada TOP. (b) Desenho da PCB do Módulo UAV camada BOTTOM.	85
B.3	(a) PCB do Módulo UAV camada TOP. (b) PCB do Módulo UAV camada BOTTOM.	86
C.1	Esquema da unidade de controlo do DronePort.	88
C.2	Esquema do circuito de controlo do motor de passo e deteção de força. . . .	89
C.3	Esquema do circuito de controlo do carregador IMAX e circuito de inversão de polaridade.	90
C.4	(a) Desenho da PCB do DronePort camada TOP. (b) Desenho da PCB do DronePort camada BOTTOM.	91
C.5	(a) PCB do DronePort camada TOP. (b) PCB do DronePort camada BOTTOM. .	92
C.6	Unidade de controlo do DronePort	93
D.1	Especificações e necessidades energéticas do DronePort.	96
D.2	Várias soluções dos módulos constituintes do sistema fotovoltaico.	97
E.1	Visão geral do software módulo Geral	100

E.2	Visão geral do software módulo BMS	100
E.3	Visão geral do software módulo MPPT	101
E.4	Visão geral do software módulo iMAX	101
F.1	Protótipo do DronePort Aberto.	104
F.2	Protótipo do DronePort Fechado.	104
F.3	Protótipo plataforma desenvolvida.	105
F.4	Legenda do protótipo plataforma desenvolvida.	105
F.5	Protótipo à escala 1:8 impresso em PLA.	106

Lista de Tabelas

2.1	Tabela comparativa das várias técnicas de equilíbrio de células [7].	10
2.2	Tabela comparativa entres as varias abordagem que permitem aumentar a autonomia energética do UAV	14
2.3	Tabela comparativa de produtos no mercado com abordagem de cabo umbilical.	16
2.4	Tabela comparativa de produtos no mercado com abordagem troca de bateria.	17
2.5	Tabela comparativa de produtos no mercado com abordagem recarga em plataformas dedicadas.	17
3.1	Especificações gerais de UAVs [42].	20
3.2	Requisitos energéticos e de autonomia do sistema.	21
4.1	Especificações gerais do DronePort.	28
4.2	Protocolo de comunicação do iMAX B6	34
4.3	Descrição das entradas de sinal do IC DRV8825	40
4.4	Descrição dos três estados da máquina de estado principal	41
4.5	Descrição dos três estados da máquina de estado do sistema de alinhamento mecânico	41
4.6	Descrição dos onze estados da máquina de estado do processo de carregamento.	44
4.7	Descrição do pacote de pedido e resposta do <i>software</i> ao DronePort	47
4.8	Descrição do pacote de resposta ao pedido 0x42	47
4.9	Descrição do pacote de resposta ao pedido de informação de estado.	48
4.10	Descrição do pacote de resposta ao pedido 0x43	49
5.1	Especificações do módulo UAV.	51
5.2	Tabela comparativa de vários circuitos integrados de BMS.	52
5.3	Descrição do pacote de pedido e resposta do módulo UAV	61

6.1	Percentagens de sucesso de aterragem e alinhamento do primeiro banco de testes	64
6.2	Percentagens de aterragem e alinhamentos com sucesso do segundo banco de testes	65

1 Introdução

Os drones, como são vulgarmente conhecidos, são veículos aéreos não tripulados (UAV¹) que estão presentes no quotidiano da nossa sociedade nas mais diversas tarefas do dia-a-dia, como por exemplo na segurança e monitorização de espaços, recolhas fotografias e cinematografia, entre outras. Devido à sua versatilidade e baixo custo, muitos investigadores reúnem esforços para aumentar cada vez mais a capacidade autónoma destes veículos tornando-os mais capazes de se auto-ajustar ao mundo que os rodeia. Integrar esta inteligência neste tipo de veículos torna-se insuficiente quando a maior limitação do seu funcionamento reside na baixa autonomia energética. Esta limitação constitui a principal entrave à aplicabilidade em tarefas remotas ou de cariz persistente. Sabemos que a falta de autonomia energética é facilmente colmatada com o aumento da capacidade da fonte de energia, contudo no caso dos UAVs, esta abordagem é inviável devido a fatores aerodinâmicos e mecânicos onde deve prevalecer um equilíbrio e assim permitir aos UAVs operarem no seu ponto de máxima eficiência.

Há estudos e produtos comerciais que tentam minimizar o problema da baixa autonomia energética, permitindo aumentar o tempo de voo ou aumentar as cargas suportadas, contudo esses sistemas apresentam custos elevados e muitas vezes implicam uma estrutura do UAV adaptada à solução, inviabilizando a utilização com UAVs convencionais.

Assim, este trabalho pretende desenvolver uma plataforma dedicada à recarga automática da bateria de UAVs proporcionando uma solução de baixo custo e fácil integração com UAVs convencionais, permitindo assim melhorar a autonomia energética destes veículos.

1.1 Motivação

Atualmente os veículos aéreos não tripulados têm tido um aumento exponencial em aplicações, como por exemplo, em missões de segurança, busca e salvamento, explorações mili-

¹UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*

tares ou florestais, monitorização agrícola ou industrial e outros. O crescimento do mercado de UAVs é impulsionado pelo elevado número de aplicações e por fatores como a inovação tecnológica em câmaras e sensores. No entanto, outros fatores como regulamentações governamentais rigorosas sobre segurança e privacidade tendem a impedir o crescimento deste mercado. Um relatório publicado pela Allied Market Research em 2018, avalia o mercado global de UAVs comerciais no valor de US \$ 2.145 milhões em 2015 e estima que em 2022 deverá atingir os US \$ 10.738 milhões [1]. A DJI, empresa fundada em 2006, maior fabricante mundial de UAVs, detentora de cerca de 70% do mercado global a partir dos meados de 2017 está avaliada em US \$ 10 bilhões, contudo, está em vias de captar US \$ 1 bilhão de investimento de capital de risco, facto este que valorizará a empresa em mais de US \$ 15 bilhões mostrando o crescimento, a estabilidade e a esperança que o mercado prevê deste setor [2].

Cada vez mais baratos, os UAVs têm ganho mercado junto da comunidade civil, como por exemplo, por fotógrafos e as ideias para a sua utilização não páram de crescer começando a aparecer empresas especializadas em realizar entregas de mercadorias e de encomendas [3].

Um UAV é constituído na sua maioria por uma bateria Li-Po², quatro a oito motores, uma unidade de controlo e uma estrutura rígida. Devido à grande demanda de energia requerida, as baterias Li-Po não permitem grandes autonomias energéticas o que limita o tempo de voo e a sua utilização em várias aplicações. O surgimento de sistemas comerciais, como por exemplo, o uso de cabo umbilical, captação de energia do ambiente e recarga automática de baterias são soluções plausíveis para o aumento da autonomia energética destes veículos, contudo, são criadas outras limitações maiores ou menores dependendo da finalidade a que o UAV se destine. Assim, através de plataformas de recarga colocadas em pontos estratégicos é possível contribuir para:

- Realização de tarefas de longas distâncias;
- Operar em missões de vigilância persistente;
- Realizar entrega de mercadorias e encomendas;
- Aumentar a autonomia.

Criando sistemas compostos por múltiplos UAVs e múltiplas plataformas capazes de se comunicar entre si, é possível realizar grandes distâncias e ao longo do seu percurso adaptar-se sem necessidade de rotas predefinidas.

²Li-Po - *Lithium Polymer*

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo projetar uma plataforma, denominada DronePort, dedicada à recarga automática da bateria do UAV de baixo custo.

O primeiro passo requer uma análise aprofundada dos estudos e do mercado com o intuito de compreender as características e funcionalidades importantes. Em termos de eletrônica é importante analisar duas vertentes: a eletrônica no UAV e a eletrônica na plataforma. A eletrônica no UAV terá de ser projetada tendo em conta as dimensões e o quão intrusivo ela é permitindo a fácil utilização de UAVs convencionais, já a plataforma deverá ser robusta, mas ao mesmo tempo com custo de produção acessível. Agregando a eletrônica à inteligência dos UAV através de microcomputadores deverá ser possível ter um sistema completamente autónomo.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é dividida em três partes. A primeira parte apresenta uma visão geral do problema da autonomia energética dos UAVs. A segunda parte descreve a arquitetura do sistema e os requisitos de dimensionamento que serão a bases do desenvolvimento. Por último, a terceira parte descreve o projeto e desenvolvimento desse sistema, bem como os testes efetuados para avaliar o seu bom funcionamento. Segue-se uma breve descrição de cada capítulo.

No Capítulo 2, Recarga Automática de UAV, é descrita a composição do UAV detalhando o tipo, as limitações e modo de utilização das baterias usadas por este veículo. É retratada numa perspetiva macro a realidade atual dos UAVs na ótica da autonomia energética. São apresentados estudos e sistemas comerciais que tentam combater esta mesma limitação fornecendo uma análise das vantagens e desvantagens das mesmas. No Capítulo 3, Arquitetura do Sistema, é apresentada a arquitetura geral e as diretrizes principais que conduzem ao desenvolvimento do sistema. O sistema está dividido em dois subsistemas: o DronePort e o UAV, onde o desenvolvimento dos mesmo estão referidos nos Capítulos 4 e 5. Por fim, no Capítulo 6, Resultados, são descritos os testes realizados e é feita uma análise rigorosa ao sistema desenvolvido.

2 Recarga Automática de UAV

Um drone é um veículo aéreo não tripulado (UAV) definido como sendo um veículo que atravessa o espaço aéreo, que voa sem tripulação e que pode ser controlado remotamente ou que pode voar autonomamente [4]. Esta definição abrange uma grande variedade de veículos, por exemplo, UAV multi-rotor, UAV de rotor único ou UAV de asas fixas. Assim, este trabalho refere UAV como sendo um veículo de descolagem vertical, multi-rotor de quatro motores, alimentado por uma bateria Li-Po e com capacidade de se mover autonomamente ou controlado através de um comando remoto. Estes UAVs são comumente utilizados em pesquisas científicas, por fotógrafos ou para fins lúdicos devido ao reduzido custo e manutenção. Contudo, estes UAVs, até a data, sofrem de limitações que reduzem o seu uso em aplicações onde é necessário percorrer grandes distâncias ou em aplicações de vigilância onde é necessária uma constante monitorização; a fraca autonomia energética e baixa capacidade de carga (*payload*) são as maiores limitações nos UAVs, onde o equilíbrio entre estes dois é fundamental para maximizar a eficiência do tempo de voo. O facto de ser necessária a intervenção do operador para substituir e recarregar a bateria do UAV depois de cada voo condiciona o uso dos UAVs em aplicações que necessitem de percorrer grandes distâncias.

A fim de aumentar a autonomia energética dos UAVs, existem três grandes abordagens: a utilização de um cabo umbilical; a captura de energia do ambiente e a recarga automática de baterias. Este último método pode usar a troca automática de baterias ou a recarga numa plataforma dedicada.

2.1 Bateria Li-Po

As baterias Li-Po são usadas pela maioria dos UAVs devido à sua grande densidade de energia disponível (Capacidade¹) e por permitirem fornecer constantemente grandes correntes à carga, todavia, o seu elevado peso traduz-se diretamente num incremento de energia

¹Capacidade - Quantidade de carga elétrica que é possível armazenar numa célula/bateria

requerida pelos motores do UAV e com isto limitando o tempo de voo. Entenda-se por bateria, um conjunto de células ligas em série e paralelo de forma a providenciar uma capacidade e uma tensão elétrica suficiente para uma dada aplicação. As células Li-Po são suscetíveis a grande desgaste quando utilizadas de forma incorreta, por exemplo, sujeitas a temperaturas elevadas, carregamentos com taxas de carga (C-Rate²) excessivas, mau controlo do processo de carregamento ou correntes de descarga elevadas reduzindo a sua vida. De forma a minimizar o desgaste e a aumentar a vida da célula é necessário garantir o correto carregamento, mas quando operamos com baterias é ainda mais importante monitorizar cada célula individualmente permitindo realizar o equilíbrio destas [5].

2.1.1 Carregamento de uma célula

O carregamento de uma célula Li-Po deve ser realizado em dois estágios distintos: o primeiro estágio deve ser realizado através de uma fonte de corrente constante e o segundo estágio através de um fonte de tensão constante. Na Figura 2.1, estão representadas dois estágios de carga, no estágio 1 é iniciado o carregamento da célula onde através de corrente constante é carregado cerca de 70% da sua capacidade total. A carga com tensão constante, estágio 2, permite carregar a restante capacidade de uma forma mais controlada evitando tensões excessivas potencialmente perigosas permitindo restabelecer a carga total. O carregamento termina quando esta atinge o limite de tensão (tipicamente 4.2 V) e a corrente cai para 3% da corrente nominal.

A taxa de descarga da célula é determinada pela aplicação, mas a taxa de carga depende do requisito do cliente. Por outro lado, diferentes células têm diferentes limitações de taxa devido à sua química e estrutura, facto este que obriga a controlar o carregamento de forma a que a taxa de carga garanta a segurança e assim prolongue a sua vida.

2.1.2 Equilíbrio de células

Quando o carregamento se realiza sobre uma bateria torna-se fundamental implementar sistemas de gestão de baterias integrados [7] (BMS³), de modo a garantir um carregamento seguro, confiável e eficiente. Uma bateria é composta por um conjunto de células idealmente iguais, todavia, tal não é possível afetando a eficiência da bateria. Por exemplo, durante uma descarga, assim que a primeira célula atinge uma tensão inferior à de corte, a descarga

²C-Rate - Taxa de carga (C)

³BMS - *Battery Management System*

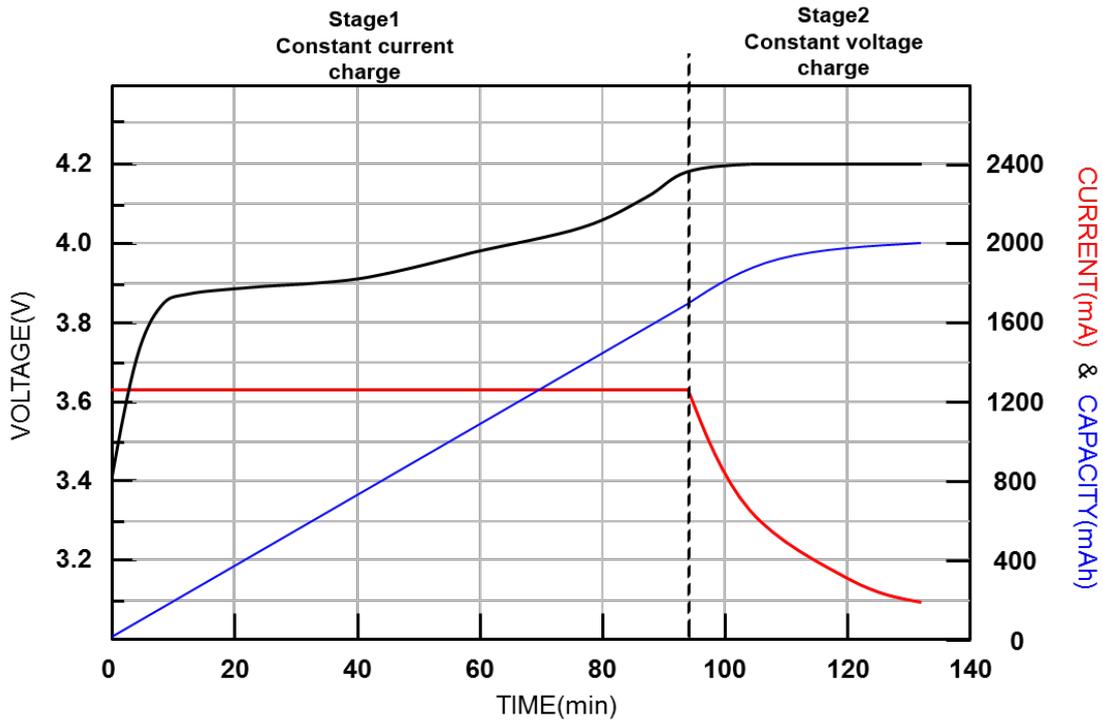


Figura 2.1: Estágios da carga de célula Li-Po [6].

é interrompida e a carga nas restantes células não podem ser utilizadas. Este tipo de incompatibilidade pode ocorrer devido a uma incompatibilidade nas capacidades das células, ou dos SOC⁴ das células. Esta é a razão pela qual o equilíbrio de células é necessário para que assim se otimize o desempenho da bateria. O BMS não só controla as condições de carga da bateria para prolongar a vida da mesma, como também providencia uma estimativa precisa do SOC e SOH⁵ para a gestão do seu carregamento. Para realizar tais tarefas, um BMS possui vários recursos para controlar e monitorizar o estado da bateria (cf. Figura 2.2).

Monitorização de Células

Para que o BMS consiga realizar as suas tarefas é necessário obter da bateria a corrente, a tensão e a temperatura de cada célula durante o carregamento. Os requisitos de tensão e corrente variam de acordo com o tipo de tecnologia de célula utilizada. A tensão das células Li-FePO₄⁶ são muito sensíveis em termos de exatidão rondando os 1 a 2 mV para se obter um SOC preciso como mostra a Figura 2.3 (a), já as células Li-Po ronda tipicamente os 5 mV o que origina uma curva menos rigorosa como observado na Figura 2.3 (b).

A medição da corrente é também uma medida que se deve realizar com muita exatidão, pois representa uma principal entrada para qualquer algoritmo SOC. A corrente é usualmente

⁴SOC - *State of Charge*

⁵SOH - *State of Health*

⁶Li-FePO₄ - *Lithium Iron Phosphate*

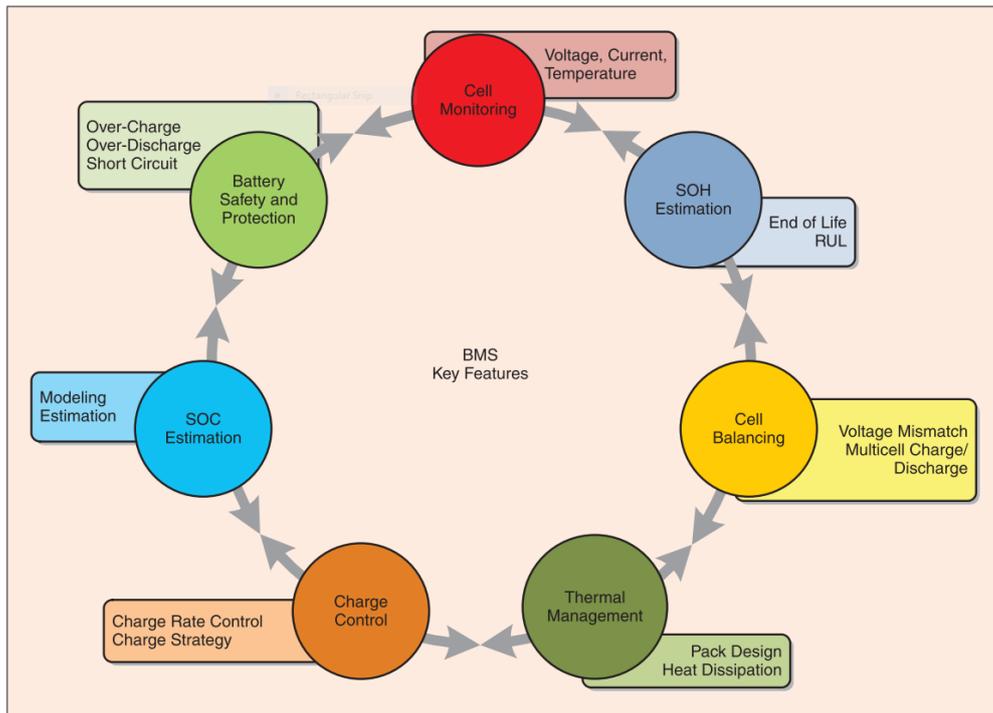


Figura 2.2: Recursos de um BMS [7].

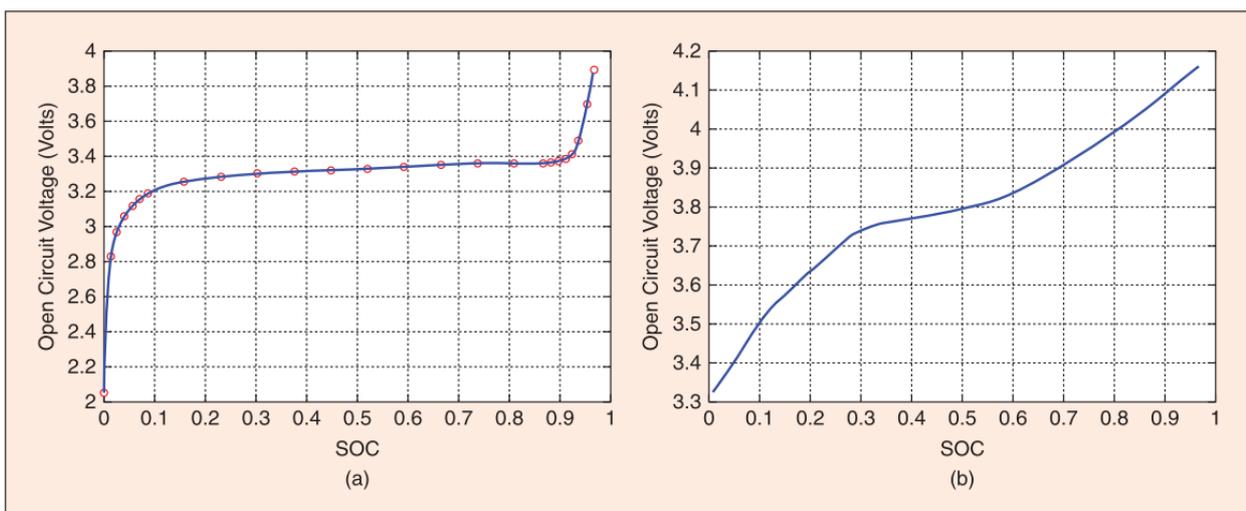


Figura 2.3: Curva OCV-SOC para diferentes tipos de células. (a) OCV-SOC para células Li-PO4. (b) OCV-SOC para células Li-Po [7].

integrada ao longo do tempo para se obter uma estimativa da carga acumulada.

Segurança e Proteção de Baterias

Uma das principais funções de um BMS é garantir a utilização segura da bateria e protegê-la de operar em condições que coloquem em risco quer a bateria quer o operador. Estas condições perigosas são muitas vezes causadas por características químicas, como carregar a bateria quando o SOC está abaixo de uma certa percentagem; sobrecarregar a bateria quando ela está totalmente carregada; carregar e descarregar a bateria com taxas de carga (C-rate) mais elevadas do que as recomendadas e ir além da tensão de corte da bateria. A temperatura de operação, é determinada pelas reações eletroquímicas dentro da bateria e pelas condições ambientais da aplicação, assim, é um elemento igualmente importante na segurança da bateria. O BMS estipula limites de segurança para a proteger permitindo trabalhar dentro de um gama de valores de temperatura, tipicamente 0 a 60 °C para carregamento e 20 a 60 °C para descarga e armazenamento.

Estimativa do SOC

SOC é um indicador que representa a carga acumulada disponível na bateria comparada com a capacidade máxima de carga da bateria. Uma boa exatidão na estimação do SOC é necessária não só para otimizar a gestão da energia de um UAV mas também para proteger a bateria de descargas profundas ou sobrecarregamento, condições estas que degradam a vida útil e criam potenciais situações de perigo. Apesar da importância deste elemento, o SOC não é possível ser medido diretamente dos terminais da bateria, motivo pela qual é necessário medir cada célula individualmente.

Estimativa do SOH

O SOH é o indicador do estado/vida da bateria prevendo o número de vezes que a bateria pode ser carregada e descarregada antes de a via útil terminar. Esta informação é importante para se poder escolher estratégias que levem ao prolongamento da vida útil da bateria e simultaneamente prever a sua substituição.

Métodos de Equilíbrio de Células

Existem várias abordagens que providenciam o equilíbrio das células, as mais utilizadas estão sumariadas na tabela 2.1 e detalhadas no Artigo [7].

Tabela 2.1: Tabela comparativa das várias técnicas de equilíbrio de células [7].

Tipo	Método de Equilíbrio	Vantagens	Desvantagens
Passivo	Cell-to-Heat	- Simples - Barato	- Baixa eficiência - Lento
Ativo	Module-to-Cell	- Complexidade reduzida - Boa eficiência - Rápido	- Rede de comutações - Isolamento elevado do conversor dc/dc
	Cell-to-Cell	- Eficiência moderada	- Circuito volumoso
	Cell-to-Cell distributed	- Moderadamente rápido - Alta eficiência	- Controlo complexo - Rede de comutações
	Cell-to-Cell shared	- Rápido	
	Cell/module bypass	- Alta eficiência - Muito rápido e flexível	- Elevadas correntes de comutação - Complexidade elevada

A implementação do tipo de equilíbrio de células passivo é direta, requerendo só um interruptor controlado e uma resistência em paralelo com cada célula para dissipar a energia extra acumulada nas células mais carregadas através de calor. O tipo de equilíbrio de células ativo transfere a energia extra das células mais carregadas para as células menos carregadas. São possíveis diferentes técnicas de equilíbrio ativo dependendo de quanta energia se deseja redistribuir entre células.

Gestão da Temperatura

A temperatura é um fator importante na operação das baterias. Além da questão da segurança que é definida pela gama de temperatura, a eficiência da bateria também é afetada pela temperatura ambiente visto degradar a capacidade aumentando a resistência interna das células. Quanto maior a resistência interna das células, maior são as perdas por efeito de Joule visto que:

$$P = R \cdot i^2 \quad (2.1)$$

onde, P é a potência instantânea dissipada em watt (W), R é a resistência interna da célula em ohm (Ω) e i é a corrente elétrica que atravessa a célula em ampere (A). Assim, o BMS precisa de ter aptidão para controlar a temperatura da bateria e mantê-la num ponto ótimo em diferentes condições operacionais.

2.2 Cabo Umbilical

A abordagem usando um cabo umbilical (TAR, de Tethered aerial robots ou PoT, de Power-over-Tether) [8, 9, 10, 11] é um mecanismo que consegue transmitir remotamente energia através de longos cabos de alimentação interligando uma estação no solo com energia persistente ao UAV, conseguindo assim garantir as necessidades de energia e estendendo o tempo das missões. Este mecanismo possui sistemas de monitoramento que permitem manter uma força no cabo de alimentação constante possibilitando fornecer mais comprimentos de cabo enquanto o UAV se movimenta livremente e retrair o mesmo quando ele for excessivo. Esta abordagem permite ao UAV mover-se sem muita dificuldade e minimizar ações indesejadas, como o vento [12], as restrições físicas inerentes ao uso de cabos podem proporcionar benefícios ao nível do controlo do UAV principalmente na presença de fortes rajadas de vento [13]. Uma vantagem adicional desta solução é permitir o uso do cabo tanto para fornecimento de energia como para transmissão de dados[14] o que para além de aumentar a autonomia energética permite obter, por exemplo, *feedback* de vídeo em tempo real[15].

O mercado apresenta uma vasta lista de produtos destinados ao fornecimento de energia elétrica permanente recorrendo ao cabo umbilical, contudo, estes não apresentam entre si diferenças significativas. A Tabela 2.3 contém vários produtos comerciais usando esta abordagem onde se verifica que os fabricantes escolhem parâmetros bastante semelhantes entre si, no entanto, existem fabricantes como a Polarity, Kewetai, Hoverfly e CyPhy que possibilitam não só o fornecimento permanente de energia ao UAV como um meio de comunicação permitindo assim obter vídeo e dados em tempo real. As distâncias de voo dos UAVs ficam bastante limitadas comparadas com o potencial destes veículos à custa do reduzido comprimento de cabo. À exceção do modelo TPS1000-3KW que permite alcançar 500 metros de comprimento, o UAV fica limitado a um raio menor do que 200 metros devido ao elevado peso do cabo. Outra especificação importante neste tipo de abordagem é a necessidade de usar tensões elétricas elevadas no cabo umbilical, o qual possibilita fornecer a mesma potência mas com correntes elétricas menores e assim diminuir o diâmetro do condutor o que reduz o custo e o peso do mesmo.

2.3 Captura de Energia

Uma solução usada em UAVs de asas fixas consiste na utilização de painéis fotovoltaicos [16]. As principais vantagens na utilização desta abordagem é a utilização da energia solar e a capacidade de sustentar o voo sem necessidade de recarregar ou trocar a bateria [17, 18, 19]. Como exemplo, o fabricante AeroVironment desenvolveu no âmbito do programa de Pesquisa Ambiental da NASA, um UAV de asa fixa denominado Helios, que permite voos de mais de 40 horas e atingir altitudes de acima de 3 km[20]. Esta abordagem não é utilizada em UAVs multi-rotores devido à elevada necessidade energética e à falta de grande área exposta não permitindo a utilização de células fotovoltaicas de dimensões adequadas.

O UAV é frequentemente utilizado na inspeção de linhas de alta-tensão devido ao processo rotineiro permitindo ser realizado de forma autónoma. Assim, começam a surgir estudos permitindo a recarga da bateria do UAV através da captação de campos eletromagnéticos gerados pelas linhas de alta-tensão enquanto realizam estas inspeções [21]. Esta abordagem será bastante promissora, tendo em conta as longa linhas de alta-tensão, o que seria possível realizar longas distâncias com um UAV.

2.4 Troca de Baterias

A troca automática de baterias [22, 23, 24, 25, 26, 27] consiste numa plataforma automática capaz de substituir a bateria do UAV sem a supervisão ou intervenção de um operador. A plataforma automatizada possui um banco de baterias prontas a ser utilizadas e pode possuir um sistema de carregamento das mesmas [28, 29] tornando um sistema eficaz, pois o tempo entre a aterragem e descolagem do UAV é reduzido.

Nesta abordagem (cf. Tabela 2.4), os fabricantes Asylon e Airobotics disponibilizam produtos baseados em troca de baterias onde a Asylon possibilita o uso de UAV genéricos e a Airobotics UAV, do próprio fabricante. O DroneHome da Asylon usa processamento de imagem para se alinhar com a bateria e assim proceder à troca da mesma, este não possui nenhum sistema de proteção climática. Já o Airobotics possui uma estrutura preparada para condições climáticas adversas e o sistema de troca de baterias é feito por intermédio de um braço robótico.

2.5 Plataforma de Carregamento

O recarregamento de baterias em plataformas dedicadas [30, 31, 32] é a solução que tem originado mais adeptos devido à maior simplicidade, versatilidade e compatibilidade com os UAVs comercializados. Estes sistemas recorrem a uma plataforma de aterragem móvel onde a mesma serve de fornecedor de energia elétrica para o UAV, podendo ser por transferência sem contacto (wireless) ou por contacto físico. Estas plataformas possibilitam a utilização de sistemas de produção de energia local, eólica ou solar fotovoltaica, tornando-as mais autónomas.

Existe um grande empenho em encontrar soluções que visam o uso da transferência de energia sem contacto, contudo existem problemas de eficiência o que prejudica o tempo de carga do UAV, devendo-se a falhas de alinhamento com a plataforma e inerentes ao sistema de transmissão e receção [33]. Esta tecnologia também tem o inconveniente de gerar inevitavelmente campos eletromagnéticos o que causa interferência nos dispositivos elétricos incluindo no próprio UAV [34, 35, 36]. A transferência de energia por contacto físico é a topologia mais simples e com maior eficiência[37, 38, 39]. A sua aplicação consiste no uso de carregadores inteligentes integrados no UAV sendo unicamente necessário a plataforma fornecer energia.

As plataformas de carregamento, cf. Tabela 2.5 são constituídas por sistemas de armazenamento de energia, sistemas de monitorização e proteção climatérica e comunicação com o exterior permitindo coletar a informação do UAV, como por exemplo, imagens, informações de sensores e do voo e enviar para a central de comando. Fabricantes como a HUS Unmanned System, SkySense, HiveUAV, COEX, Percepto e SwarmX criaram plataformas deste tipo. O DroneBox da HUS Unmanned System distingue-se por apresentar uma solução onde permite o fornecimento de energia sem fios e por ter a capacidade de gerar energia através de painéis fotovoltaicos. O mecanismo de alinhamento utilizado pela maioria dos fabricantes recai sobre o uso do GPS⁷ possibilitando assim aos fabricantes de UAV's escolherem os seus sensores, contudo o Hive da HiveUAV e o Copter Express da COEX possuem um sistema de alinhamento mecânico garantindo a centralização do UAV na plataforma. A Wibotic disponibiliza a denominada PowerPad, uma base de carregamento wireless que permite uma integração total com UAVs convencionais. Esta é uma solução simples destinada exclusivamente a carregamento das baterias. A Skysense também disponibiliza uma base de carregamento, no entanto com fornecimento de energia por contacto. Estes produtos não são

⁷GPS - *Global Positioning System*

Tabela 2.2: Tabela comparativa entres as varias abordagem que permitem aumentar a autonomia energética do UAV

Abordagem	Eficiência	Adaptação Estrutural do UAV	Distância Permitida	Tempo de Recarga
Cabo Umbilical	Elevada	Fácil	Reduzida	Nulo
Captura Energia	Dependente de fatores externos	Difícil	Elevada	Nulo
Troca Bateria	Elevada	Difícil	Elevada	Reduzido
Plataforma de Carregamento	Elevada	Fácil	Elevada	Elevado

plataformas de carregamento, mas sim uma base de carregamento onde estas não possuem monitorização e proteção climatérica nem os sistemas de alinhamento na base.

2.6 Conclusões

As soluções supramencionadas permitem melhorar a autonomia energética dos UAV, contudo todas obrigam a algum tipo de compromissos como mostra a Tabela 2.2. O cabo umbilical proporciona um boa solução, contudo, a distância permitida é reduzida o que limita a aplicação do UAV em várias aplicações. A captura de energia fica muito comprometida em UAV de descolagem vertical devido à elevada demanda energética. Este veiculo tem como contra uma reduzida área exposta não permitindo a utilização de paineis fotovoltaicos ajustados aos requisitos. O facto de depender de condições climatéricas favoráveis limita a aplicação do UAV a momentos específicos do dia e do local. Já a abordagem de troca de bateria é um sistema complexo e mecânico. O facto de ser um sistema mecânico obriga o UAV a possuir uma estrutura adaptada à plataforma de forma a permitir a troca da bateria, facto este que impossibilita o uso de UAVs convencionais [40, 41]. Minimizando estas restrições a abordagem recorrendo a plataformas de carregamento torna-se mais viável contudo obriga à interrupção da missão do UAV durante um período de tempo.

Esta dissertação focou o seu trabalho na implementação de uma plataforma de carregamento, solução que permite abranger o maior número de aplicações e com o menor custo. Esta abordagem implica a mínima adaptabilidade do UAV ao sistema permitindo aumentar o número de UAVs compatíveis com a plataforma. Embora não tenham sido obtidos preços dos sistemas disponíveis, estes são bastantes dispendiosos e por isso optou-se por este desenvolvimento. O custo de desenvolvimento é reduzido comparado por exemplo com sistema usando cabo umbilical ou sistema de troca de baterias pois não possui sistemas mecânicos

complexos e não necessita de grandes unidades de processamentos. O desenvolvimento de uma solução utilizando esta abordagem permite adquirir conhecimento sobre as suas limitações e necessidades e contribui com conhecimento científico aumentando a investigação nesta vertente.

Tabela 2.3: Tabela comparativa de produtos no mercado com abordagem de cabo umbilical.

Cabo Umbilical						
Fabricante	Modelo	Características				
		Potência (W)	Tensão (V)	Comprimento de cabo (m)	Peso do cabo (kg/100m)	Comunicação com UAV
MMC ^a	T1 Tether System		200-400	200	2	Não
Embention ^b	TS150	2200		150	1.65	Não
NTP Drone ^c	PowerLine	3000	380	100		Não
Elistair ^d	Safe-T Tether	2500		100		Não
Elistair	Ligh-t V3	1200		60		Não
Drone Aviation ^e	Fuse Tether System			60		Não
Hoverfly ^f	Power tether			60		Não
Polarity ^g	TPS1000-3KW	3000		500		Ótica
CyPhy ^h	PARC			120		Ótica
Hoverfly	LiveSky			100		Ótica
KEWEITAI ⁱ	KWT-TMOP-100	3000		100		Ótica

^aMMC. T1 Tether System [online]; URL: <http://www.mmcuav.com/drones/t1-tether-system/>

^bEmbention. NM TS150 [online]; URL: <https://products.embention.com/nmand-uas-rpas-solutions/ts150-tethered-station>

^cPowerline. Tethered Drones/Unlimited Power [online]; URL: <https://www.ntpdrones.com/>

^dElistair. Innovative Airborne Solutions [online]; URL: <https://elistair.com/>

^eDrone Aviation corp. Fuse tether System [online]; URL: <https://www.droneaviationcorp.com/solutions/fuse-tether-system>

^fHoverfly. [online]; URL: <https://hoverflytech.com/>

^gPolarity. Powered by Polarity [online]; URL: <http://www.polarity.net/>

^hCyFly. Persistent Aerial Solution [online]; URL: <https://www.cyflyworks.com/>

ⁱKeweitai. [online]; URL: <http://en.keweitai.com/>

Tabela 2.4: Tabela comparativa de produtos no mercado com abordagem troca de bateria.

Troca de Bateria							
Fabricante	Modelo	Características					
		UAV compatíveis de energia	Geração de energia	Estação meteorológica	Proteção Climática	Sistema alinhamento	Comunicação
Asylon ^a	DroneHome	Genérico	Não	Não	Não	Sim	Sim
Airobotics ^b		Específico	Não	Não	Sim	Sim	Sim

Tabela 2.5: Tabela comparativa de produtos no mercado com abordagem recarga em plataformas dedicadas.

Recarga em plataformas dedicadas									
Fabricante	Modelo	Características							
		Tipo de contacto	UAV compatíveis	Geração de energia	Estação meteorológica	Proteção climática	Sistema alinhamento	Comunicação	
HiveUAV ^c	Hive	Físico	Específico	Não		Sim	Mecânico	Sim	Sim
COEX ^d	Copter Express	Físico	Específico	Não	Sim	Sim	Mecânico	4G LTE	
Percepto ^e	Percepto Base	Físico	Específico	Não		IP65	GPS	Sim	Sim
SwarmX ^f	Hive	Físico	Genérico			Sim	GPS	Sim	Sim
SkySense	Charging Pad	Físico	Genérico	Não	Não	IP55	Não	Ethernet	Ethernet
SkySense ^g	SkyPort	Físico	Genérico	Sim	Sim	IP55	GPS	Ethernet	Ethernet
HUS Unmanned System ^h	DroneBox	Sem Fios	Genérico	Sim	Anemómetro	IP65	GPS	GPS	Ethernet 3G/4G LTE
WiBotic ⁱ	PowerPad	Sem Fios	Genérico	Não	Não	Não	Não	Não	Não

^aAsylon. [online]; URL: <http://www.flyasylon.com/>

^bAirobotics. Automated industrial drones [online]; URL: <https://www.airoboticsdrones.com/>

^cHIVEUAV. Automated. Unlimited [online]; URL: <http://hiveuav.com/>

^dCOEX. Copter express [online]; URL: <http://copterexpress.com/>

^ePercepto. Meet your future operations team [online]; URL: <http://percepto.co/>

^fSwarmX. [online]; URL: <http://www.swarmx.co/>

^gSkysense. Autonomous Drone Charging Infrastructure [online]; URL: <http://www.skysense.co/>

^hHUS Unmanned System. [online]; URL: <https://www.hus.sg/>

ⁱWIBOTIC. Aerial Applications [online]; URL: <https://www.wibotic.com/aerial-applications/>

3 Arquitetura do Sistema

Numa perspetiva geral o sistema a desenvolver é composto por duas estruturas, o DronePort e o UAV. O DronePort é o elemento que alberga e fornece energia ao drone. Para que isso ocorra, o UAV deve ser adaptado através de um mecanismo que permita o contacto elétrico e de elementos que permita a carga segura da bateria.

Assim, este capítulo descreve os requisitos em termos de dimensionamento dos sistemas e a arquitetura dos mesmos.

3.1 Requisitos de Dimensionamento

O desenvolvimento do sistema necessita ser moldado às especificações mais usadas em UAVs permitindo aumentar a compatibilidade desses. Os UAVs comercializados para uso geral enquadram-se maioritariamente nas especificações da Tabela 3.1, adicionalmente, transversal a todos os UAVs, estes possuem: um sistemas de localização através de GPS; contêm meios de comunicação via RF¹, denominados módulo de telemetria; possuem sistemas de controlo remoto; e principalmente por uma unidade de controlo. Como base de desenvol-

¹RF - *Radio frequency*

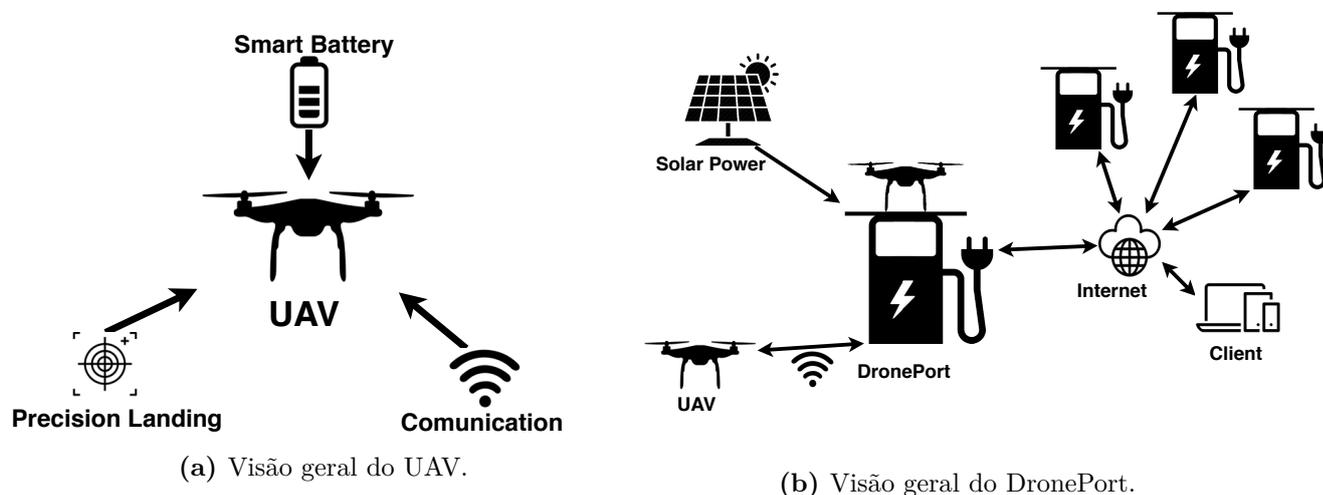


Figura 3.1: Esquema da visão geral do sistema

Tabela 3.1: Especificações gerais de UAVs [42].

	Mínimo	Standard	Máximo
Tipo de bateria		Li-Po	
Número de células	3	4	6
Capacidade (mAh)	1000	3000	7000
C-Rate (C)	10	25	40
Potência em repouso (W)	1.2	1.4	2.5
Potência em movimento (W)	28	100	640
Dimensão da diagonal (mm)	< 330	450	> 800

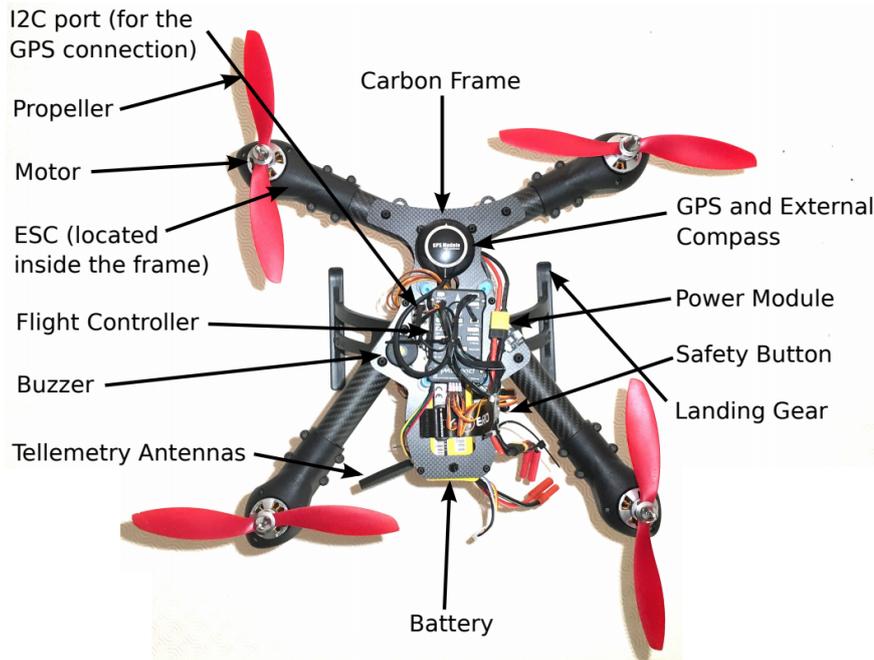


Figura 3.2: Componentes principais do UAV utilizado.

vimento, o UAV utilizado (representado na Figura 3.2) possui uma diagonal de 450 mm , é alimentado por uma bateria Li-Po de 3700 mAh de quatro células com um C-Rate de 25 C , possui um GPS M8N² equipado com bússola, utiliza um módulo de telemetria da 3DR³ na banda 433 MHz , é controlado remotamente por um sistema da FrSky⁴ e comandado por uma unidade de controlo da empresa Pixhawk⁵. Este UAV pesa na sua totalidade 1500 g , consumindo em média 1.5 W no estado de repouso. Em voo estacionário a potência média aumenta para 94 W podendo atingir picos de 237 W .

Pela Figura 3.1 é necessário especificar os requisitos de energia da plataforma permitindo dimensionar o sistemas de geração de energia local. Assim, os requisitos são detalhados na Tabela 3.2, onde a potência máxima do sistema é relativa à estimativa realizada no Anexo

²GPS M8N [online]; URL: <https://www.u-blox.com/en/product/neo-m8-series>

³3DR. Construction is hard. Drones make it easier [online]; URL: <https://3dr.com/>

⁴FrSky [online]; URL: <https://www.frsky-rc.com/product/taranis-x9d-plus-2/>

⁵Pixhawk [online]; URL: <http://pixhawk.org/>

Tabela 3.2: Requisitos energéticos e de autonomia do sistema.

Tensão do DronePort	12 V
Potência Máxima	213 W
Número de dias de autonomia (N_a)	3
Número de carregamentos/dia (N_c)	5
Tempo de funcionamento (t_f)	24 h
Tempo médio de alinhamento (t_a)	5 min
Tempo médio de carregamento (t_c)	1 h
Rendimento do sistema (R_s)	83%

D.1. O dimensionamento, baseado no número de horas de sol por dia e na radiação solar em Coimbra, permite encontrar várias soluções que satisfazem os requisitos energéticos (cf. Anexo D.2), como por exemplo, utilizar dois painéis fotovoltaicos de 100 Wp em paralelo, usar três baterias de AGM⁶ com 150 Ah de capacidade em paralelo e utilizar um regulador de carga de 10 A.

Numa perspectiva funcional, o DronePort deverá ser capaz de albergar UAVs de dimensões entre 450 mm a 680 mm garantindo o correto posicionamento e conseguir detetar e reconfigurar a polaridade do UAV em relação à plataforma. O UAV deve realizar uma aterragem com precisão e suave, deve conseguir comunicar com o DronePort e detetar o seu estado operacional.

3.2 Arquitetura do DronePort

A arquitetura do DronePort (cf. Figura 3.3) está dividida em seis módulos: o módulo de geração de energia elétrica; o módulo do carregador inteligente; o módulo do inversor de polaridade; o módulo do sistema de alinhamento; o módulo de comunicação; e o módulo de processamento. O módulo de processamento será responsável por coletar todas as informações dos restantes módulos permitindo agir e assegurar o correto funcionamento do DronePort. Este deverá conseguir transferir energia elétrica para o UAV através de contacto físico garantindo a máxima eficiência do sistema.

3.2.1 Geração de Energia Elétrica

O DronePort deve conter meios de produção energética local, recorrendo a painéis fotovoltaicos. No que concerne à plataforma, esta deve conseguir gerir este recurso de forma eficiente e prever a capacidade de realizar um carregamento, para tal é necessário conseguir

⁶AGM - *Absorbent Glass Mat*

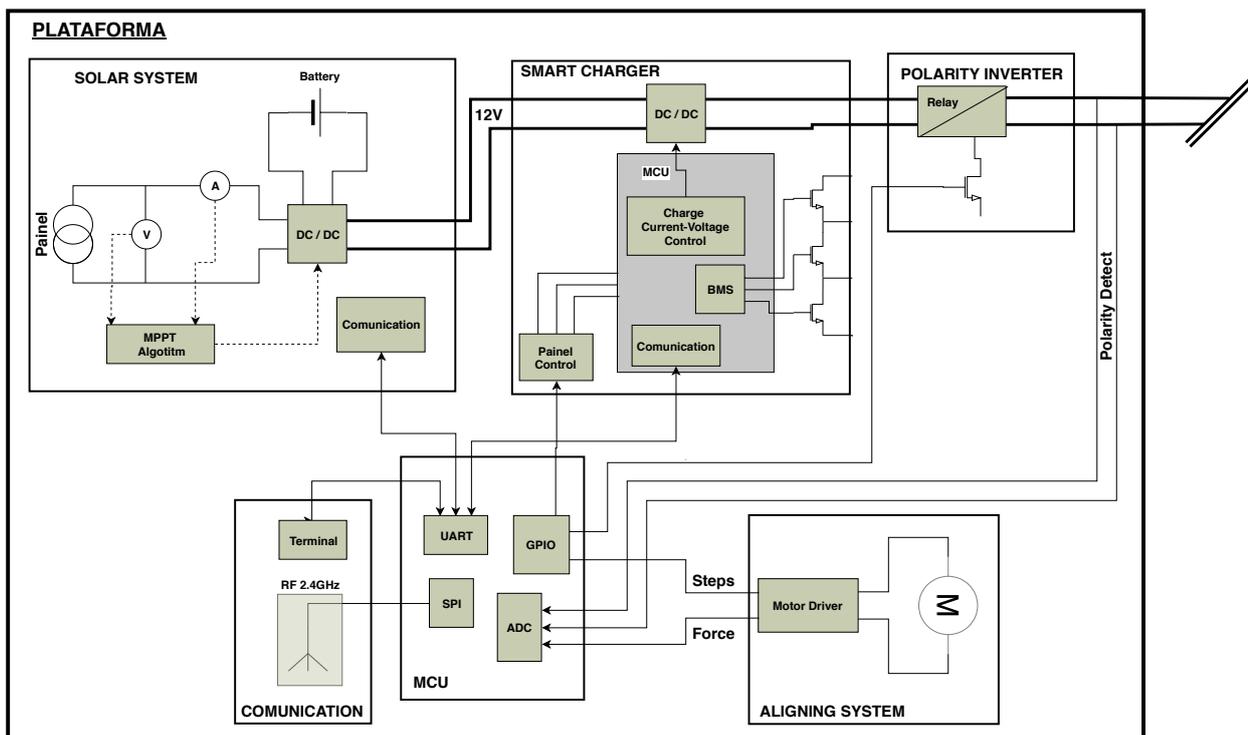


Figura 3.3: Arquitetura do DronePort.

analisar variáveis como por exemplo: potência produzida; nível de carga da bateria local e corrente de carga à saída do sistema fotovoltaico. A geração de energia elétrica através da energia solar é constituída por dois elementos fundamentais: um painel fotovoltaico e um regulador de carga. O painel fotovoltaico é responsável por converter a energia solar em energia elétrica, enquanto que o regulador de carga tenta maximizar a potência extraída do painel fotovoltaico enquanto a guarda numa bateria local. A potência de saída de uma célula fotovoltaica depende da tensão de polarização da célula, da irradiação solar e da temperatura. Desta forma é necessário procurar sistematicamente o ponto de polarização que assegura a máxima potência gerada (MPPT⁷) (cf. Figura 3.4).

3.2.2 Carregador Inteligente

O carregador inteligente é um dispositivo capaz de carregar de forma controlada vários tipos de baterias, conseguindo monitorizar e equilibrar várias células individualmente, também assegura o correto carregamento proporcionando um perfil de carga adequado ao tipo de bateria. Assim estes carregadores são constituídos por: Uma unidade de controlo; um conversor DC/DC e um circuito de equilíbrio de células. A unidade de controlo monitoriza todo o processo de carga controlando o conversor DC/DC de maneira a proporcionar um perfil de carga correto, este também monitoriza cada célula da bateria e comanda o circuito

⁷MPPT - *Maximum Power Point Tracking*

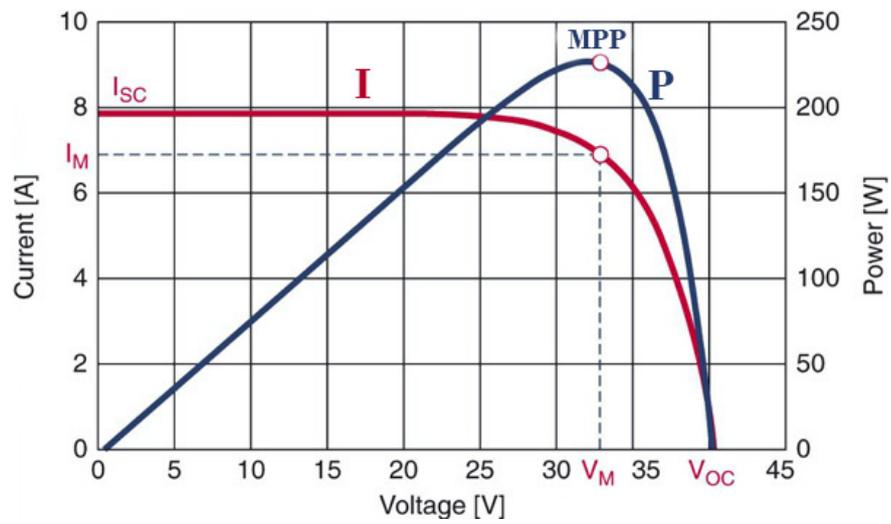


Figura 3.4: Gráfico da extração do ponto de máxima potência de um painel fotovoltaica [43].

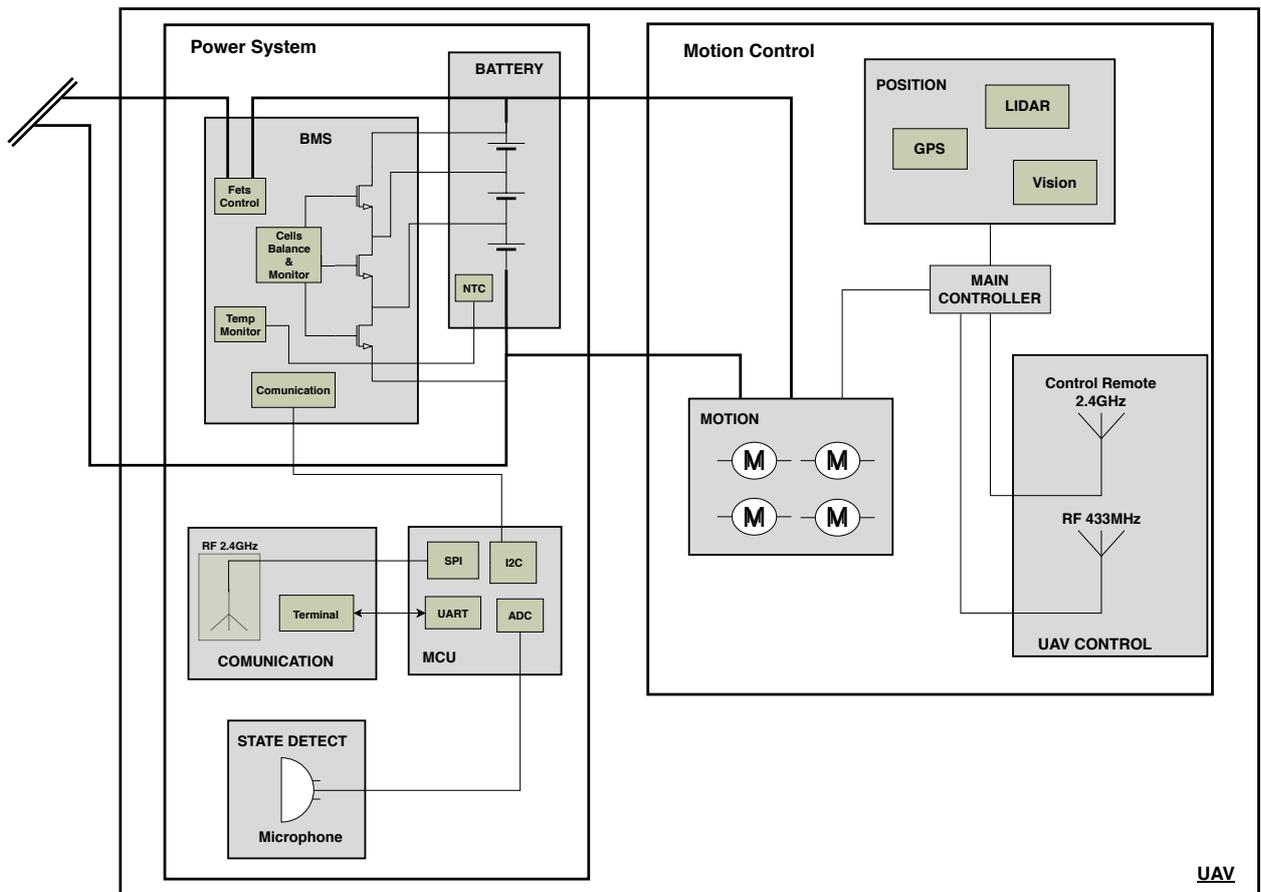


Figura 3.5: Arquitetura do UAV.

de equilíbrio (BMS). Com o intuito de reduzir a complexidade da ligação entre UAV e DronePort o BMS fará parte integrante da arquitetura do UAV e assim o carregador inteligente resume-se ao controlo do perfil de carga fornecendo ao UAV uma carga correta para uma determinada especificação de bateria.

3.2.3 Inversor de Polaridade

Sendo desconhecida a possibilidade de o UAV realizar uma aterragem com uma orientação definida é necessário garantir a correta polarização da bateria do UAV em relação ao carregador inteligente. Assim, o sistema deverá conter um mecanismo que detete a polaridade numa primeira instância e que possibilite inverter os terminais à saída do carregador inteligente caso seja necessário.

3.2.4 Sistema de Alinhamento

De forma a garantir o correto posicionamento do UAV, o DronePort deverá dispor de um sistema mecânico que permita deslocar o UAV centralizando-o na plataforma. Este sistema deverá possuir um motor de passo que possibilite deslocar duas barras sincronizadas e que percorra toda a área da plataforma.

3.2.5 Comunicação

Os meios de comunicação auxiliam no controlo e gestão da utilização do DronePort. O UAV, quando necessita de realizar um carregamento, deverá comunicar com a plataforma mais próxima a fim de verificar se a mesma se encontra livre e com energia suficiente através de módulos de comunicação de longo alcance. No entanto aquando da aterragem do UAV na plataforma, deve ser estabelecida uma comunicação segura de curto alcance que permita transferir informações do UAV para o DronePort como o controlo de várias variáveis inerentes ao carregamento. Outro meio de comunicação que o DronePort deve possuir é uma comunicação com a Internet, possibilitando a monitorização e controlo da plataforma remotamente. Tendo este meio de comunicação é possível criar uma rede de DronePorts através do qual podem trocar informações úteis entre si.

3.3 Arquitetura do UAV

A arquitetura do UAV (cf. Figura 3.5) é dividida em dois módulos: o módulo do sistema de alimentação e o módulo do controlo de movimento. No módulo do sistema de alimentação será realizado o controlo e monitorização da alimentação do UAV quando existe uma recarga da bateria, auxiliado por meios de comunicação que permite uma troca de informação contínua entre este e o DronePort. O módulo de controlo de movimento representa os vários elementos constituintes do UAV, como por exemplo, motores, controlo remoto, sensores, entre outros. O UAV deverá estabelecer um contacto físico com o DronePort através de contactos metálicos capazes de assegurar a transferência de energia necessária à recarga da bateria do UAV.

3.3.1 Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação é um módulo do UAV que incorpora todos os elementos relativos à gestão, ao carregamento e ao fornecimento de energia. O desenvolvimento deste módulo deve ter em conta a sua implementação numa grande variedade de UAVs, assim, este módulo é constituído por: uma bateria; uma unidade BMS; uma unidade de processamento; meios de comunicação e uma unidade de deteção de estado. A unidade de processamento será responsável por interligar as diferentes unidades, a unidade BMS monitoriza e equilibra as células quando um carregamento é realizado, enquanto a deteção de estado se destina a determinar se o UAV está em movimento ou em repouso, por fim a unidade de comunicação que permite estabelecer uma comunicação com o DronePort. Quando o UAV aterra na plataforma é conveniente estabelecer uma comunicação de curto alcance para troca de informação garantindo a segurança da informação e a diminuição de erros inerentes ao sistema, somando a vantagem de libertar a comunicação de longo alcance permitindo comunicar com outros UAVs.

3.3.2 Controlo de Movimento

O módulo de controlo de movimento representa os vários elementos de um UAV convencional, contudo, é necessário adicionar à unidade de posicionamento elementos que garantam um correto posicionamento e uma aterragem precisa na plataforma. O posicionamento de UAVs é normalmente assegurado a partir da informação disponível por GPS, no entanto, para que um UAV possa carregar automaticamente numa plataforma é necessário recor-

rer a métodos adicionais, como sensores de visão e sensores de medição de distâncias, que permitam aumentar a exatidão da aterragem.

Quando o UAV necessita de carregar as suas baterias, é necessário conhecer a localização dos DronePorts e também comunicar com eles para saber a disponibilidade para os albergar. Esta comunicação poderá necessitar de ser estabelecida a centenas de metros o que obriga à utilização de sistemas de comunicação de longo alcance, este sistema é normalmente parte integrante do UAV identificado como módulo de telemetria. Quando o UAV se encontra a recarregar a bateria, a comunicação de longo alcance é libertada permitindo comunicar com outros UAVs.

4 DronePort

O DronePort (cf. Anexo F.1, F.2 e F.5) é uma plataforma capaz de carregar um UAV através de uma base de carregamento por contacto físico, que inclui sistemas de alinhamento, proteção climatérica e meios de produção de energia. Esta dissertação focou-se no desenvolvimento da plataforma de carregamento (cf. Anexo F.3 e F.4) que inclui o sistema de alinhamento do UAV e onde foi integrado o sistema de produção de energia local.

O presente capítulo descreve a implementação de *hardware* e *software* da plataforma DronePort. São também detalhados as várias adaptações e os protocolos descodificados necessários ao desenvolvimento da mesma.

4.1 *Hardware*

A plataforma de carregamento é constituída por uma unidade de controlo a cargo de um microcontrolador STM32F401RE da STM onde interliga e gere vários módulos:

- Controlador de motor de passo;
- Carregador inteligente de baterias;
- Inversor de polaridade;
- Unidade de comunicação;
- Unidade de geração de energia local.

A Figura 4.1 detalha a arquitetura de *hardware* do DronePort onde são mostrados os diversos elementos do sistema e as suas interações. Esta permitiu o desenvolvimento da plataforma (cf. Anexo C) originando as especificações detalhadas na Tabela 4.1

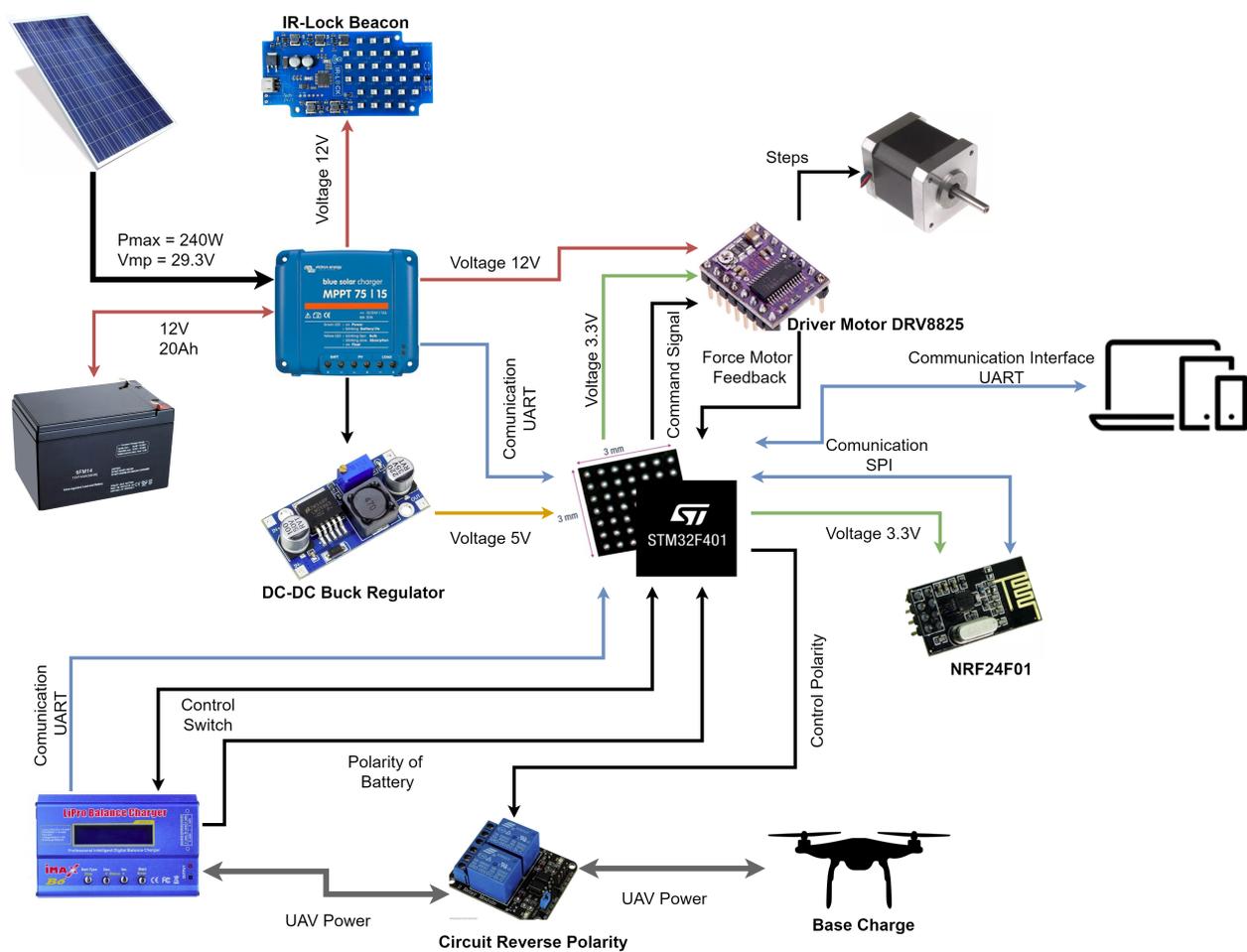


Figura 4.1: Diagrama de interatividade entre módulos.

Tabela 4.1: Especificações gerais do DronePort.

Sistema de Geração de Energia	Potência de pico (W_p)	240
	Tensão painel fotovoltaico (V)	29
	Tensão da bateria (V)	12
	Capacidade da Bateria (Ah)	20
	Corrente de carga nominal (A)	15
Sistema de Carregamento	Tensões de alimentação (V)	12/5/3.3
	Carregador	iMAXB6
	Comunicação com exterior	UART
	Sistema de alinhamento	Mecânico e ótico
	Dimensões (cm)	100x100x4

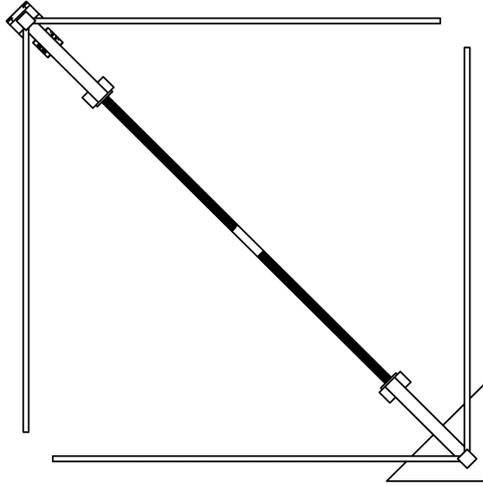


Figura 4.2: Esquema do sistema de alinhamento na plataforma.

4.1.1 Sistema de Alinhamento Mecânico

O sistema de alinhamento mecânico proporciona uma garantia extra do correto posicionamento e uma maior compatibilidade de UAVs. Este mecanismo, representado na Figura 4.2, garante a centralização do UAV em relação a plataforma permitindo o correto carregamento da bateria. Ele é constituído por dois veios sem fim, de sentidos opostos, ligados a um motor através de uma transmissão direta transformando um movimento rotacional em dois movimentos translacionais de sentidos opostos. Para gerar o movimento rotacional optou-se pelo uso de um motor de passo NEMA17 com tensão nominal de 12 V e uma corrente por fase de no máximo de 1 A. A escolha deste tipo de motor deve-se à capacidade de controlar o posicionamento em malha aberta evitando uma maior complexidade no dimensionamento do sistema. O motor de passo é controlado por um IC¹ DRV8825² da Texas Instruments com uma *breakout board* da Pololu permitindo economizar ligações com o microcontrolador. O IC DRV8825 é um controlador de motores de passo bipolares que permite gerar *microstepping*, protege o motor limitando a corrente e permite regular a resolução do *microstepping*. A tensão de funcionamento é de 8.2 V até 45 V e consegue controlar motores com uma corrente por fase de 2.5 A.

Com a finalidade de tornar o sistema mais versátil foi implementado um mecanismo que permite determinar a centralização do UAV. Esta condição é determinada quando a corrente que atravessa a bobine do motor ultrapassa um dado limiar pré-definido.

¹IC - *Integrated Circuit*

²DRV8825 - <https://www.pololu.com/product/2133>

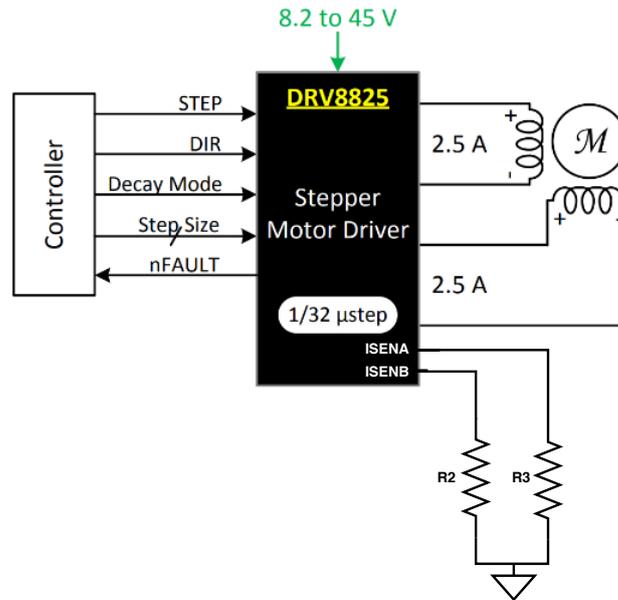


Figura 4.3: Esquema elétrico simplificado do IC DRV8825.

Deteção da Corrente do Motor

Através do IC DRV8825 foi possível criar um mecanismo que permite medir a quantidade de corrente nas bobinas do motor e conseqüentemente determinar se a centralização do UAV ocorre com sucesso. Na Figura 4.3 é possível verificar como é detetado a corrente elétrica do motor através das entradas *ISENA* e *ISENB* e das resistências R_2 e R_3 . Os sinais existentes nestas entradas possuem amplitudes de tensão reduzidas impossibilitando a leitura por um ADC³. Assim houve a necessidade de implementar um circuito amplificador (cf. Anexo C.2) onde permite medir a tensão do sinal amplificado. Este sinal é amplificado por um ganho G dado por:

$$G = 1 + \frac{R_3}{R_4} = 1 + \frac{R_5}{R_6} = 101 \left(\frac{V}{V} \right) \quad (4.1)$$

Houve necessidade de implementar dois andares de filtragem passa-baixo de primeira ordem para diminuir as oscilações do *microstepping* e do ruído gerado pelo motor. A geração do *microstepping* ocorre a uma frequência de 30 kHz e essa frequência reflete-se na corrente elétrica nas bobinas do motor. Com o intuito de eliminar este fenómeno e ter medidas mais viáveis foi implementado um filtro passa-baixo com frequência de corte $F_c = 1.6kHz$ antes do andar de amplificação. Para eliminar o ruído produzido pelo motor e altas frequências foi implementado um segundo andar de filtragem passa-baixo com $F_c = 3.3kHz$. A medição da tensão do circuito é feita através de um ADC de 12 bits do microcontrolador permitindo

³ADC - Analog to Digital Converter

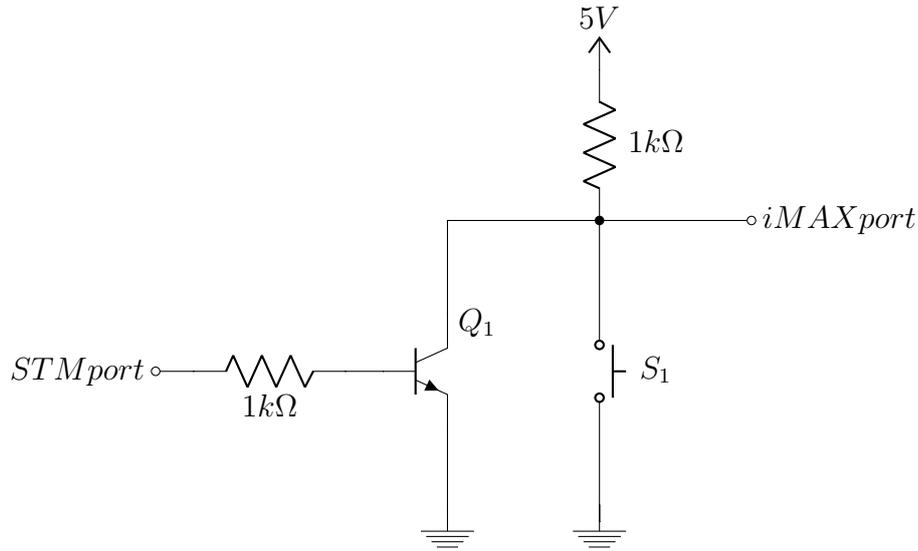


Figura 4.4: Esquema de controlo de um botão do iMAX B6.

ter uma resolução de $805 \mu V$.

4.1.2 Carregador

De forma a permitir um carregamento eficiente e seguro o DronePort contém um carregador inteligente de baterias. Optou-se pela adaptação de um carregador inteligente comercial e através de engenharia reversa acrescentar as funcionalidades necessárias. Para o desenvolvimento deste trabalho foi escolhido o carregador iMAX B6 devido ao seu custo e simplicidade de funcionamento. Este permite operar com tensões de alimentação de $11 V$ a $18 V$, suporta baterias de até 6 células e permite carregamentos com taxas de carga até $5 A$.

Uma funcionalidade acrescentada ao iMAX B6 consiste na possibilidade de ser controlado externamente por outro MCU⁴ (cf. Anexo C.3). Foi implementado um controlo através de transístor NPN de forma a simular os botões existentes (cf. Figura 4.4). O transístor é operado na zona de corte e saturação dependendo do estímulo dado pelo microcontrolador através da base do transístor. Quando o transístor opera na saturação o circuito é fechado através de Q_1 originando a transição do nível alto para o nível baixo na entrada do microcontrolador do iMAX B6 (iMAXport). Este carregador disponibiliza um saída de comunicação permitindo assim obter *feedback* das ações realizadas pelo esquema da Figura 4.4.

O iMAX B6 deteta a polaridade da bateria aos seus terminais, contudo, não a disponibiliza através da saída de comunicação. O circuito interno de deteção do carregador consiste em dois divisores de tensão, um para cada terminal, onde se verificada a tensão de cada

⁴MCU - *Microcontroller Unit*

um através dos ADCs do microcontrolador do iMAX. Intercetando estes sinais através dos ADCs do MCU do DronePort consegue-se determinar a polaridade da bateria do UAV em relação à plataforma.

4.1.3 Inversor de Polaridade

Supondo a impossibilidade de garantir a orientação do UAV na aterragem é necessário criar um mecanismo que permita inverter a polaridade dos terminais da bateria do UAV em relação à plataforma. O inversor de polaridade é realizado por um relé de dois circuitos (cf. Anexo C.3) permitindo inverter o sentido de circulação da corrente elétrica. Esta é monitorizada pelo detetor de polaridade implementado no iMAX B6 sendo posteriormente automaticamente controlado pelo MCU do DronePort.

4.1.4 Comunicação

O DronePort é constituído por dois terminais de comunicação, um para comunicar com o UAV e um segundo para comunicações externas. A comunicação com o UAV é realizada através de um módulo nRF24L01⁵ da fabricante Nordic. O nRF24L01 é um circuito integrado de muito baixo consumo (ULP, de *Ultra Low Power*) com velocidade de transferência de 2 *Mbps* e uma velocidade de comunicação 2.4 *GHz* na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) permitindo estabelecer comunicações de curto alcance. O segundo meio de comunicação é efetuado através de uma porta UART permitindo uma comunicação bidirecional. Este meio de comunicação permite ser ligado com vários dispositivos externos compatíveis com este protocolo tornando um sistema comunicável através da Internet.

4.1.5 Geração de Energia Elétrica

O sistema de geração de energia local permite tornar o DronePort mais autónomo. Foi dimensionado um sistema fotovoltaico (cf. Anexo D) capaz de fornecer energia ao DronePort mantendo-o em funcionamento por longos períodos de tempo.

A primeira fase consiste em analisar o sistema e avaliar as necessidades energéticas da plataforma e os requisitos do sistema (cf. Tabela 3.2). O DronePort é um sistema que possui três estados distintos de consumo energético. O primeiro estado ocorre quando se encontra em repouso consumindo uma potência em vazio P_v permanente 24/24 horas, o segundo estado ocorre quando a plataforma realiza o alinhamento do UAV com uma duração de 5

⁵nRF24L01 - <https://www.nordicsemi.com>

minutos consumindo uma potência P_a e por ultimo uma potência aquando do carregamento do UAV P_c estimado em 1 hora por carregamento. O cálculo do consumo energético é dado por:

$$\text{Consumo}_{\text{Energetico}} = P_v \cdot t_f + P_a \cdot N_c \cdot \frac{t_a}{60} + P_c \cdot N_c \cdot t_c = 997 \text{ Wh} \quad (4.2)$$

Como requisito é pretendido que a plataforma fique operacional durante três dias sem radiação solar, assim, é necessário um bom dimensionamento do sistema de armazenamento, como tal fatores como a profundidade máxima de descarga da bateria (p_{des}), tensão da bateria (V_{batt}), número de dias de autonomia e o consumo energético são tidos em conta no dimensionamento deste sistema. A capacidade mínima da bateria (C_{min}) é dado por:

$$C_{min} = \frac{\text{Consumo}_{\text{Energetico}} \cdot N_a}{V_{batt} \cdot p_{des}} = 415 \text{ Ah} \quad (4.3)$$

sendo $p_{des} = 60\%$.

Para realizar a escolha dos painéis fotovoltaicos é necessário conhecer a potência de pico necessária (P_{pico}) dada por:

$$P_{pico} = \frac{\text{Consumo}_{\text{Energetico}} \cdot R_s}{N_{sol}} = 112 \text{ Wp} \quad (4.4)$$

onde $N_{sol} = 7.4$ h corresponde ao número de horas de sol por dia em Coimbra.

Devido a fatores temporais e ao sistema de alimentação ser um sistema sujeito a alteração foi conveniente implementar o sistema fotovoltaico com os recursos existentes de forma a demonstrar o conceito. Assim o sistema fotovoltaico utilizado resume-se às especificações representadas na Tabela 4.1 onde é utilizado um painel fotovoltaico de 240 W de potência de pico do fabricante Mprime, um regulador de carga de 10 A do fabricante Victron Energy modelo BlueSolar MPPT 75|15 e uma bateria de 12 V com 20 Ah de capacidade do fabricante Zenith.

4.2 Software

O desenvolvimento do *firmware*⁶ divide-se em quatro fases: o desenvolvimento de bibliotecas para o carregador iMAX B6, para o regulador de carga BlueSolar e para o controlador de motor DRV8825; o desenvolvimento do *firmware* principal para o DronePort; a criação de

⁶ *Firware* - Parte do código projetado para controlar o *hardware* e que não sofre alterações ao longo do tempo

```

7B 9E 84 84 D0 85 80 EE 81 81 81 80 81 94 8A 80
81 96 82 8A 82 8E 86 81 81 80 8A 80 8A 80 8C B2
80 82 95 87 CC 80 80 80 80 8D CF 80 BA 83 D8 83
D6 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80
80 80 80 80 80 80 81 8F A4 38 30 7D

```

Figura 4.5: Pacote de dados enviado pelo iMAX B6

um protocolo de comunicação com o exterior e por ultimo o desenvolvimento de um *software* que permite monitorizar a plataforma.

4.2.1 Carregador iMAX B6

O carregador iMAX B6 disponibiliza uma porta de comunicação unidirecional usando o protocolo UART, contudo, não existe documentação que permita uma fácil integração em sistemas embebidos. O protocolo de comunicação foi descodificado de forma a permitir a monitorização e o controlo através do MCU do DronePort.

O protocolo de comunicação é constituído por 74 bytes (cf. Figura 4.5) contidos entre dois caracteres: "{" (0x7B) e "}" (0x7D). Os dois últimos *bytes* contêm quatro *bits* correspondentes ao resto da divisão por 0x100 da soma dos primeiros 72 *bytes* de dados:

$$(0x9E + 0x84 + \dots + 0x8F + 0xA4) \% 0x100 = 0x80 \rightarrow 0x38\ 0x30$$

Todos os 72 bytes do pacote têm o bit mais significativo a nível alto (0x80) sendo 7 bits de dados efetivos. Na Tabela 4.2 está uma lista parcial dos bytes enviados, pois não foi possível descodificar a função de todos eles.

Tabela 4.2: Protocolo de comunicação do iMAX B6

Byte	Descrição	Química da bateria
0x08	<ul style="list-style-type: none"> • Bit 0x01 é ativo quando está a carregar • Bit 0x10 é ativo quando está em modo ciclo 	
0x09	Corrente elétrica de carga em %0.1 A	NiCd
0x0A	Corrente elétrica de descarga em %0.1 A	NiCd
0x0B	Bit 0x01 contem o modo de ciclo	NiCd
0x0C	Contador de ciclos	NiCd
0x0D	Corrente elétrica de carga em %0.1 A	NiMH

0x0E	Corrente elétrica de descarga em %0.1 A	NiMH
0x0F	Bit 0x01 contem o modo de ciclo	NiMH
0x10	Contador de ciclos	NiMH
0x11	Corrente elétrica de carga programável em %0.1 A	Lipo
0x12	Número de células de carga programável	Lipo
0x13	Corrente elétrica de descarga programável em %0.1 A	Lipo
0x14	Número de células de descarga programável	Lipo
0x15	Corrente elétrica de carga programável em %0.1 A	Pb
0x16	Número de células programável	Pb
0x17	Estado do menu: <ul style="list-style-type: none"> • 0x80: Config • 0x81: LiPo • 0x82: NiMH • 0x83: NiCd • 0x84: Pb • 0x85: Save • 0x86: Load 	
0x18	Estado de operação. 0x01 ativo quando em operação	
0x19	Tensão elétrica de descarga MSB ⁷ em %1 V	NiMH
0x1A	Tensão elétrica de descarga LSB ⁸ em %0.01 V	NiMH
0x1B	Tensão elétrica de descarga MSB em %1 V	NiCd
0x1C	Tensão elétrica de descarga LSB em %0.01 V	NiCd
0x21	Corrente elétrica instantânea MSB em %1 A	
0x22	Corrente elétrica instantânea LSB em %0.01 A	
0x23	Tensão elétrica instantânea MSB em %1 V	
0x24	Tensão elétrica instantânea LSB em %0.01V	
0x25	Tensão elétrica de alimentação MSB em %1 V	
0x26	Tensão elétrica de alimentação LSB em %0.01 V	
0x2B	Potência entregue à carga MSB em %1 Ah	
0x2C	Potência entregue à carga LSB em %0.001 Ah	
0x2D	Tensão elétrica da célula 1 MSB em %1 V	

⁷MSB - *Most Significant Bit*

⁸LSB - *Least Significant Bit*

0x2E	Tensão elétrica da célula 1 LSB em %0.01V	
0x2F	Tensão elétrica da célula 2 MSB em %1 V	
0x30	Tensão elétrica da célula 2 LSB em %0.01V	
0x31	Tensão elétrica da célula 3 MSB em %1 V	
0x32	Tensão elétrica da célula 3 LSB em %0.01V	
0x33	Tensão elétrica da célula 4 MSB em %1 V	
0x34	Tensão elétrica da célula 4 LSB em %0.01V	
0x35	Tensão elétrica da célula 5 MSB em %1 V	
0x36	Tensão elétrica da célula 5 LSB em %0.01V	
0x37	Tensão elétrica da célula 6 MSB em %1 V	
0x38	Tensão elétrica da célula 6 LSB em %0.01V	
0x46	Tempo decorrido de carga ou descarga em minutos	

Tendo-se decodificado o protocolo de comunicação estão abertas as condições necessárias a integração do iMAX B6 no MCU do DronePort. Contudo a integração total passa pelo controlo através dos botões de comando pois o protocolo usado é exclusivamente unidirecional permitindo somente leituras. Assim foi necessário perceber o comportamento a diferentes estímulos, por exemplo com diferentes durações de tempo com o botão em circuito fechado e com diferentes sequências de botões. O iMAX B6 possui quatro botões de controlo: BT1, BT2, BT3 e BT4 como visível na Figura 4.6, somando ao BT4 uma dupla função dependendo do tempo que se encontra em circuito fechado. O BT1 permite seleccionar o menu principal e interromper qualquer operação em curso, enquanto que o BT2 e BT3 permite navegar entre os sub-menus e alterar os valores das variáveis, por fim o BT4 com uma duração curta de 200 milissegundos em circuito fechado permite confirmar uma alteração de valor de variável e com uma duração longa de 3 segundos permite dar início a uma operação.

Na biblioteca foram integradas funções de deteção e controlo de polaridade, funções que permitem decodificar o protocolo de comunicação e funções de controlo.

O carregador bloqueia a comunicação sempre que ocorre algum erro incluindo quando existe um inversão de polaridade aos seus terminais. Portanto foi necessário implementar a deteção através do MCU do DronePort com recurso a dois ADCs. A deteção de polaridade é obtida através do sinal da diferença entre duas tensões V_+ e V_-

$$Polarity = \text{sgn}(V_+ - V_-) \quad (4.5)$$

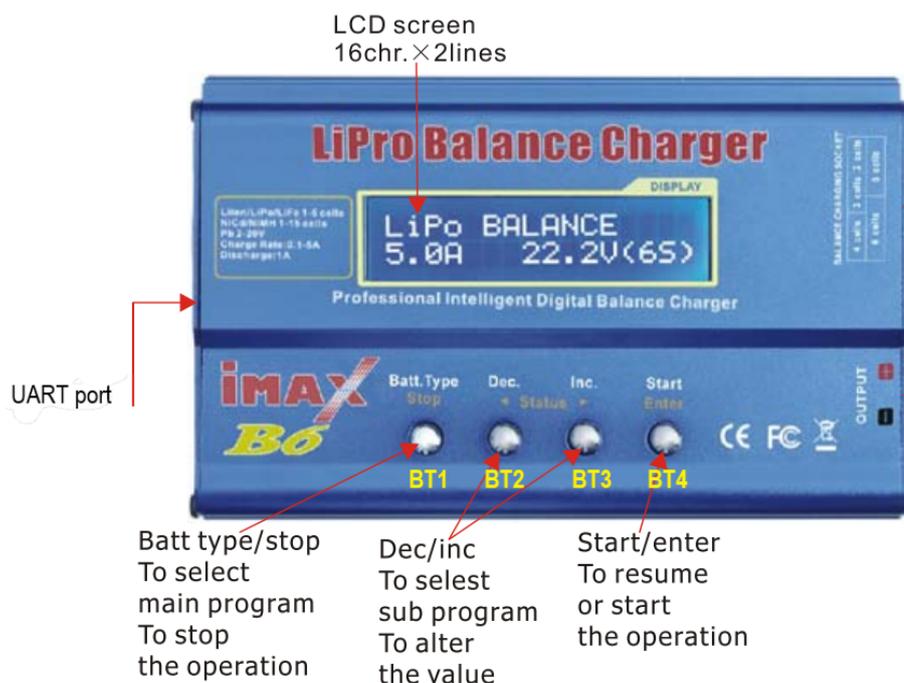


Figura 4.6: Legenda dos botões de controlo do carregador iMAX B6

contudo, a tensão proveniente do terminal positivo V_+ possui um offset de 2 V o que não permite a deteção do sinal em várias circunstâncias. A alternativa encontrada passa por implementar uma segunda verificação ao terminal V_- estipulando uma tensão limiar que permita detetar uma polarização invertida.

4.2.2 Regulador de carga BlueSolar

Para efeitos de monitorização da geração de energia elétrica é necessário incorporar um meio de comunicação entre o regulador de carga e o MCU. O BlueSolar disponibiliza um meio de comunicação bidirecional, VE.Direct, usando protocolo UART⁹ onde permite configurar e monitorizar todo o regulador. O Victron Energy, fabricante do BlueSolar MPPT 75|15 disponibiliza uma larga documentação sobre o protocolo de comunicação¹⁰, exemplos de aplicação¹¹ e também projetos que usam o BlueSolar em diversas aplicações. A interface do VE.Direct inclui dois modos: modo de texto e o modo hexadecimal. A finalidade do modo de texto é tornar as informações de recuperação extremamente simples transmitindo periodicamente todos os pacotes. O modo HEX permite não apenas ler dados, mas também gravar dados.

Nesta dissertação foi usado o modo de texto onde a cada segundo é enviado um pacote

⁹UART - *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*

¹⁰Victron Energy – Documentação <https://www.victronenergy.com/support-and-downloads/whitepapers>

¹¹Victron Energy – Exemplos https://www.victronenergy.com/live/vedirect_protocol:faq

Identifier	Meaning
<Newline>	A carriage return followed by a line feed (0x0D, 0x0A).
<Field-Label>	An arbitrary length label that identifies the field. Where applicable, this will be the same as the label that is used on the LCD.
<Tab>	A horizontal tab (0x09).
<Field-Value>	The ASCII formatted value of this field. The number of characters transmitted depends on the magnitude and sign of the value.

Figura 4.7: Definição dos identificadores do BlueSolar

de dados. O pacote de dados é encapsulado no formato:

<Newline><Field-Label><Tab><Field-Value>

Os identificadores são definidos na Figura 4.7. O pacote não possui um tamanho fixo o que levou à implementação de um algoritmo capaz de decodificar o pacote conseguindo extrair o identificador <Field-Label> e o seu valor <Field-Value>. O termino do pacote ocorre quando a resultante do resto da divisão da soma de todos os bytes por 0x100 é igual a zero permitindo verificar que o pacote recebido não contém erros.

Para a implementação do algoritmo (cf. Figura 4.8), o MCU foi configurado para receber os dados através do DMA¹² permitindo o CPU ser independente dos dados recebidos e consequentemente aumentar a fiabilidade do sistema. O DMA foi configurado em modo circular tornando o *buffer* de entrada em numa topologia FIFO¹³ permitindo haver uma atualização contínua. Supondo um *buffer* com um pacote de dados por analisar, no algoritmo entra o primeiro byte do buffer e verifica se o byte corresponde a "\n" (0x0A), caso afirmativo a decodificação do protocolo é iniciada e ao Label[0] é atribuído o valor do byte subsequente. No próximo byte é verificado se corresponde a "\t" (0x09) indicando a transição entre Label e Value, onde em caso negativo o byte é adicionado a Label[i] e incrementado a variável *i*, em caso afirmativo é verificado se o Label é igual a "CHECKSUM" conduzindo a verificação do CRC¹⁴ de todos os dados recebidos e em caso negativo dá entrada o próximo byte para análise. Com a entrada do novo byte é verificado se corresponde a "\n" (0x0A) onde em caso negativo o byte é adicionado a Value[i], não esquecendo que o pacote começa com o byte (0x0D) seguido de (0x0A). Por fim caso o byte seja igual a "\n" (0x0A) é dado início a uma nova decodificação do pacote sendo este pacote pertencente a uma nova entrada no *buffer*.

Com um algoritmo que permite decodificar todas as mensagens do BlueSolar foi possível desenvolver uma biblioteca que permite a fácil integração no projeto. Esta é constituída por

¹²DMA - *Direct Memory Access*

¹³FIFO - *First In, First Out*

¹⁴CRC - *Cyclic Redundancy Check*

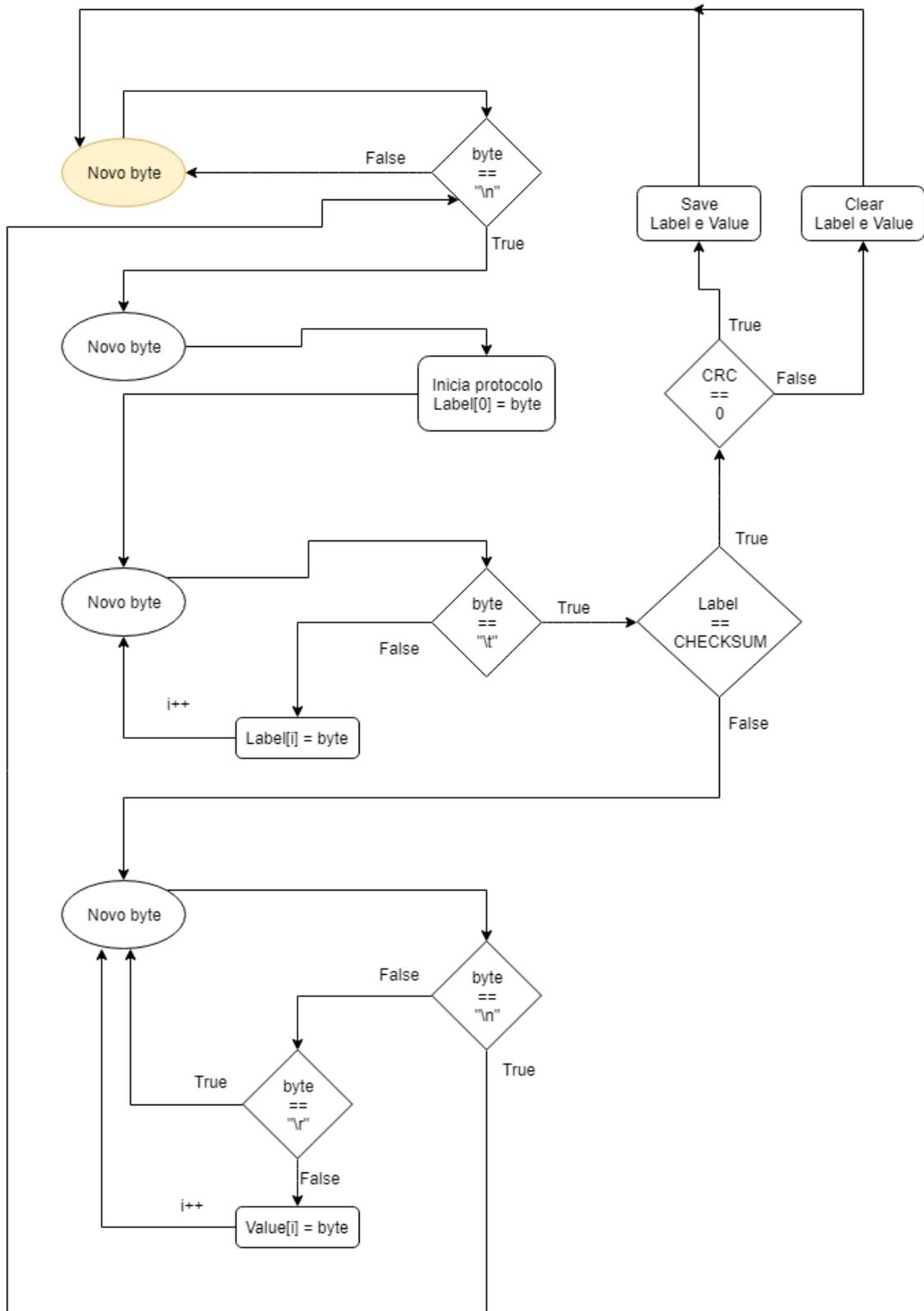


Figura 4.8: Fluxograma da decodificação de mensagens do BlueSolar

Tabela 4.3: Descrição das entradas de sinal do IC DRV8825

Entrada	Descrição
STEP	Cada pulso para a entrada STEP corresponde a um <i>microstep</i> do motor de passo na direção selecionada pela entrada DIR.
DIR	Entrada que seleciona a direção de rotação do motor
ENABLE	Entrada que liga ou desliga a alimentação do motor
M0 / M1 / M2	Seleciona a resolução do <i>microstep</i> dentro de seis possibilidades: <ul style="list-style-type: none"> • Full Step • Half Step • 1/4 Step • 1/8 Step • 1/16 Step • 1/32 Step

uma estrutura com cada *Label* e correspondente *Value*, como por exemplo a tensão da bateria, a tensão do painel fotovoltaico, a potência do painel fotovoltaico, a corrente elétrica da carga, o estado do regulador de carga, entre outras.

4.2.3 Controlador de motor de passo

De forma a tornar mais legível o código-fonte e permitir a integração do IC DRV8825 em futuros projetos foi desenvolvida uma biblioteca que o controla. O controlador DRV8825 possui seis entradas descritas na Tabela 4.3. A entrada STEP é comanda por pulsos que são desencadeados a uma determinada frequência produzindo um determinado RPM¹⁵ no veio do motor de passo, para tal é necessário conhecer o número de pulsos por volta do motor $N_{(step/volta)}$, a resolução do *microstepping* R_{micro} , e a velocidade desejada em *RPM* permitindo calcular a frequência através da equação 4.6.

$$Step/s = \frac{RPM \cdot N_{step/volta} \cdot R_{micro}}{60} \quad (4.6)$$

A geração dos pulsos é realizada com base no temporizador do MCU. A biblioteca permite comandar o motor de passo fornecendo como parâmetro o número de passos desejado, uma rotação em graus ou uma velocidade de rotação contínua. Permite também, caso o *hardware* envolvente o permita, configurar a resolução do *microstep* por *software* e desligar ou ligar a alimentação do motor de passo.

¹⁵RPM - Rotações por Minuto

Tabela 4.4: Descrição dos três estados da máquina de estado principal

Estado (MainState)	Descrição
EMPTY	Estado de repouso aguardando informação do UAV
ALIGNING	Estado onde é manipulado o sistema de alinhamento mecânico
WORKING	Estado onde se controla e monitoriza o carregamento do UAV

Tabela 4.5: Descrição dos três estados da máquina de estado do sistema de alinhamento mecânico

Estado (AlignState)	Descrição
CENTERING	Estado que realiza a centralização do UAV na plataforma
OPENING	Estado que abre as barras de alinhamento 10 centímetros
HOME	Estado que abre as barras de alinhamento até a posição inicial

4.2.4 *Firmware*

O *firmware* que faz suporte a todas as funcionalidades do DronePort está estruturado numa máquina de estado principal responsável por comandar o modo de operação em que se encontra o sistema, dividida em três estados (cf. Tabela 4.4).

Analisando o fluxograma da Figura 4.9, o sistema inicia com um conjunto de inicializações e configurações dos diferentes módulos inerentes ao DronePort. Entrando num ciclo infinito, a primeira etapa consiste em verificar se existe um pedido de informação por parte de um *software* externo ocorrendo uma troca de informação entre o DronePort e o mesmo. Sempre que ocorre um inicialização do DronePort o sistema de alinhamento mecânico abre na sua totalidade (posição inicial). Posteriormente no estado "EMPTY" o sistema aguarda uma comunicação de um UAV que caso exista inicia o processo de alinhamento, correspondendo ao estado "ALIGNING". Por fim é iniciando o estado "WORKING" dando início ao processo de carregamento.

A máquina de estado do sistema de alinhamento mecânico (SAM¹⁶) (cf. Figura 4.10) é executada em dois momentos distintos: quando o DronePort inicia e quando o UAV aterriza na plataforma onde a mesma possui três estados possíveis identificados na Tabela 4.5.

Quando o DronePort inicia, a máquina de estado do SAM encontra-se no estado "HOME" obrigando o sistema de alinhamento a abrir as barras até uma posição inicial, esta posição é detetada através da corrente do motor quando a mesma ultrapassa um valor definido. Após se realizar a operação, a máquina de estado principal é colocada no estado "EMPTY" aguardando uma comunicação do UAV. Quando é detetado a presença de um UAV na plataforma é inicializado o processo de alinhamento através do estado "CENTERING" condição validada quando a força que o motor exerce é superior a um determinado limiar. Após a

¹⁶SAM - Sistema de Alinhamento Mecânico

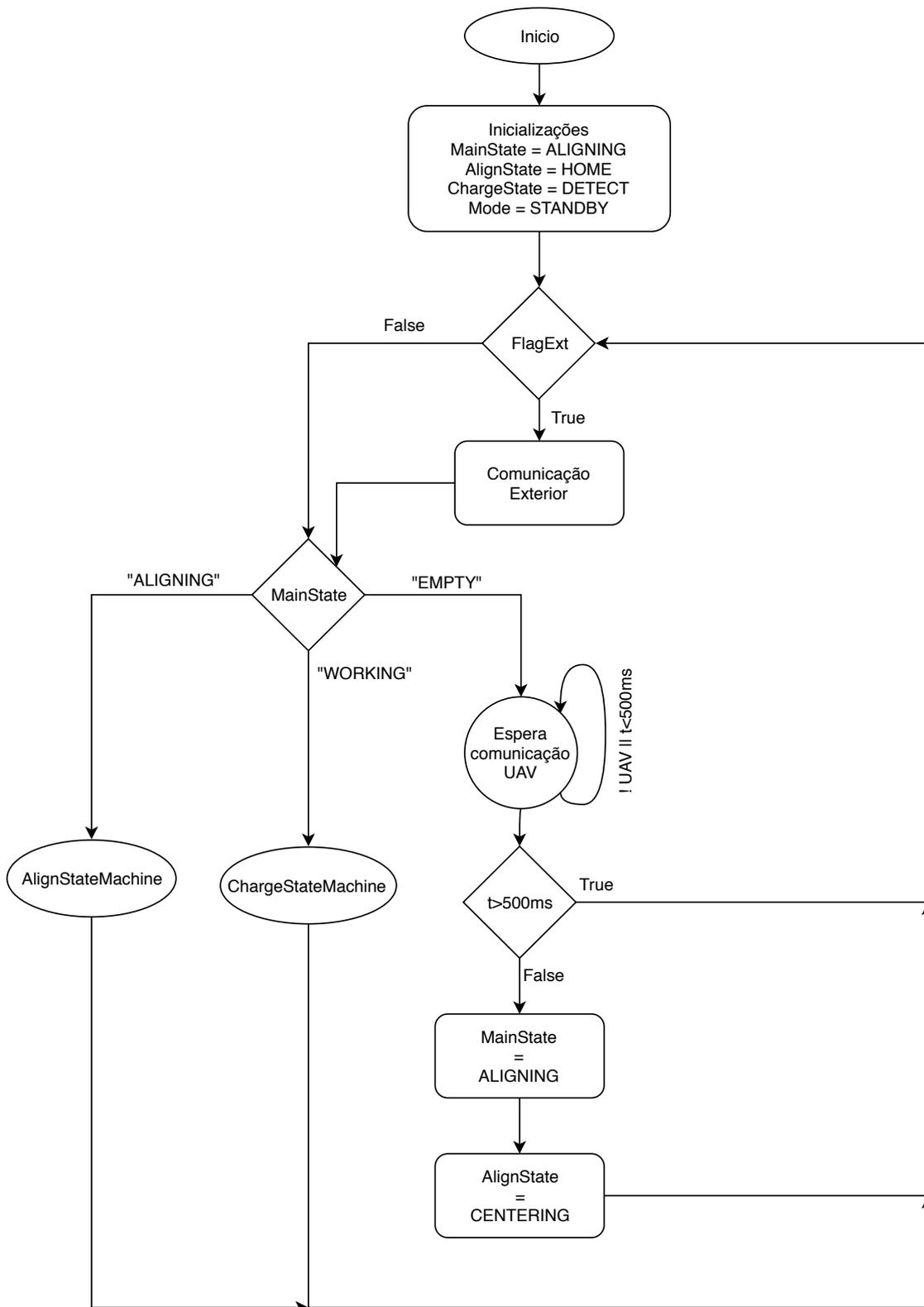


Figura 4.9: Fluxograma da máquina de estados principal do DronePort

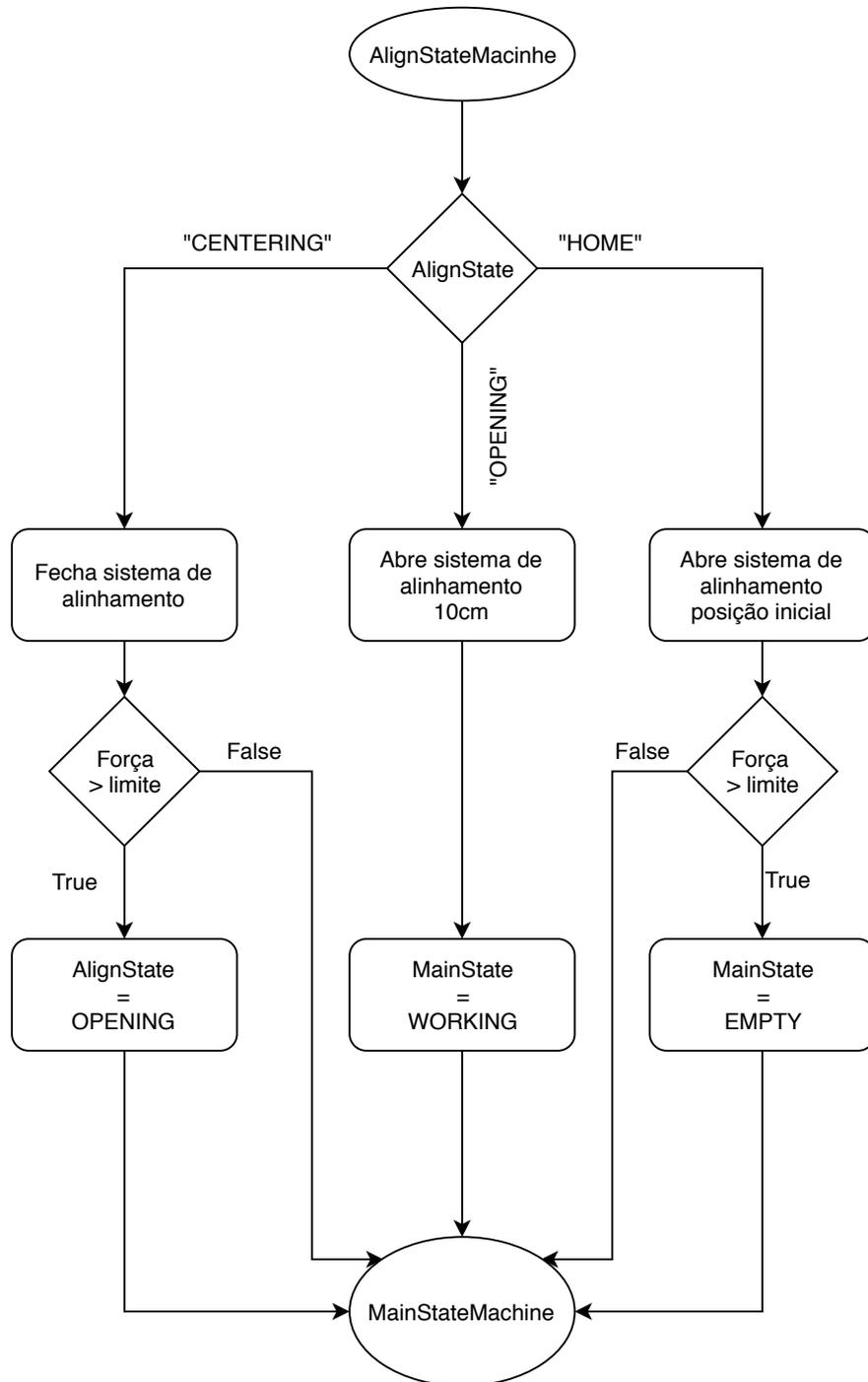


Figura 4.10: Fluxograma da máquina de estado do sistema de alinhamento mecânico.

Tabela 4.6: Descrição dos onze estados da máquina de estado do processo de carregamento.

Estado (ChargeState)	Descrição
DETECT	Estado que verifica a presença do UAV na plataforma.
POLARITY	Estado que verifica a polaridade do UAV em relação à plataforma.
GET_MPPT	Estado que manipula os novos dados recebidos do regulador de carga.
GET_BMS	Estado que manipula os novos dados recebidos pelo UAV referente ao BMS.
GET_IMAX	Estado que manipula os novos dados recebido do carregador IMAX B6.
CHECK_BATT	Estado que verifica se os níveis de tensão das baterias do sistema estão dentro dos limites, DronePort e UAV.
CHECK_PARM	Estado que verifica a correspondência entre as especificações do UAV e as do carregador, manipulando as mesmas.
START_CHARGING	Estado que inicia o processo de carregamento.
VERIFY_CHARGING	Estado que verifica se ocorreu erros ao iniciar o processo de carregamento.
CHARGING	Estado que monitoriza o carregamento.
FINISH	Estado que verifica se o processo de carregamento foi terminado.

centralização é iniciado o estado "OPENING" onde o sistema de alinhamento abre as barras 10 centímetros em relação à posição central permitindo que o UAV descole sem qualquer restrição. Após estes procedimentos é iniciado o carregamento da bateria do UAV.

Iniciado a máquina de estado do processo começa uma sequência de estados que permitem validar e monitorizar toda a recarga (cf. Figura 4.11). Esta máquina de estado é composta por onze estados descritos na Tabela 4.6.

Antes de o carregamento ser iniciado são feitas varias verificações que permitem estimar o sucesso do carregamento. No estado "DETECT" é verificado através da medição da tensão aos terminais do UAV se existe um valor que permita determinar a existência desse. Em caso negativo significa que o UAV não foi centralizado com sucesso na plataforma ou houve uma possível descolagem do UAV. Caso a validação da presença do UAV seja verdadeira é iniciado o estado "POLARITY" onde é verificado a polaridade e realizado o seu ajuste. De seguida é iniciado o processo de aquisição de valores dos diferentes dispositivos, como do regulador de carga, do carregador inteligente e do BMS. Diferenciada dos restantes dispositivos a aquisição de novos valores do BMS é realizada através de um pedido ao UAV . Aquando da receção do

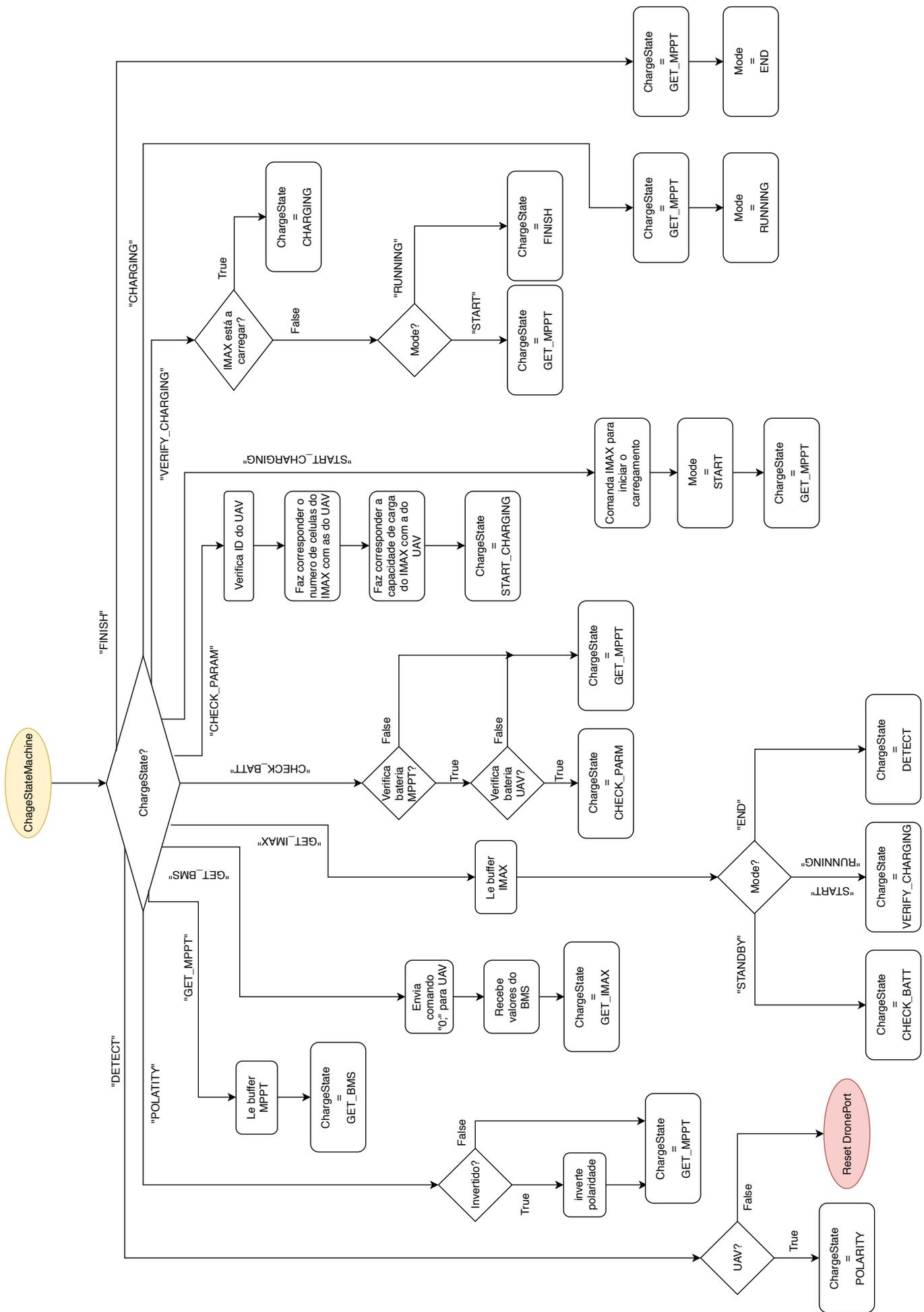


Figura 4.11: Fluxograma da máquina de estado do processo de carregamento.

pacote é verificada a identificação do UAV através do ID permitindo validar as especificações desse. No estado "GET_IMAX" são lidos os novos valores do carregador e é verificado em que modo de operação a máquina de estado se encontra. Existem quatro modos possíveis: "STANDBY", "START", "RUNNING" e "END". Numa primeira fase o modo de operação é "STANDBY" sinalizando que ainda não houve um processo de inicialização de carga. Numa segunda fase o modo pode ser "START" ou "RUNNING" indicando o início do processo de recarga. Por fim o modo "END" indica o fim do carregamento verificando continuamente a presença do UAV na plataforma.

O estado "CHECK_BATT" verifica a tensão da bateria local ou a ocorrência de erros no DronePort através dos valores do regulador de carga, contudo, antes de iniciar o carregamento é necessário verificar a tensão da bateria do UAV. Após estas validações são verificadas as especificações do UAV (número de células e a capacidade da bateria) através do ID fazendo corresponder as especificações de carregamento no iMAX B6 às especificações existentes na base de dados, caso não exista uma correspondência do ID na base de dados são introduzidas especificações gerais predefinidas como: 4 células e 1000 *mAh* de capacidade.

Verificados todos os parâmetros supramencionados é dado início ao carregamento no estado "START_CHARGING" onde é desencadeada uma nova análise aos dados recebidos. Devido ao fato do carregador não detectar instantaneamente o início do processo do carregamento é necessário analisar várias vezes o estado operacional do carregador com o intuito de validar o início de carregamento, caso tal não ocorra indicia a ocorrência de um erro por parte do carregador. Validado o início do carregamento é então iniciada a monitorização no estado "CHARGING" detetando eventuais erros ou o seu termino. No estado "FINISH" é ativado o modo "END" permitindo a constante monitorização dos dispositivos, fechando assim um ciclo de carga.

4.2.5 Comunicação Exterior

De forma a criar um meio de comunicação entre o DronePort e o exterior foi criado um protocolo de comunicação que permite obter várias informações do estado de operação. O protocolo funciona na base de pedido-resposta onde permite obter informação dos valores do BMS, da geração de energia e das configurações do carregador, mas também permite controlar as configurações do carregador e controlar os MOSFETS¹⁷ de corte do BMS. O pacote de pedido (cf. Tabela 4.7), contém um byte destinado ao tipo de pedido e um byte

¹⁷MOSFET - *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

Tabela 4.7: Descrição do pacote de pedido e resposta do *software* ao DronePort

Pedido	Ação	Resposta	Bytes
0x30	Pedido de informação referente ao BMS	46 valores com os valores do BMS e identificador do UAV	139
0x31	Pedido para desligar o MOSFETS de corte	"OK-"	3
0x32	Pedido para ligar o MOSFETS de corte	"OK-"	3
0x33	Controlada o botão BT1 do carregador	Sem retorno	0
0x34	Controlada o botão BT2 do carregador	Sem retorno	0
0x35	Controlada o botão BT3 do carregador	Sem retorno	0
0x36	Controlada o botão BT4 do carregador, ação curta	Sem retorno	0
0x37	Controlada o botão BT4 do carregador, ação longa	Sem retorno	0
0x41	Pedido de informação referente ao estado do DronePort	Tabela 4.9	3
0x42	Pedido de informação referente ao regulador de carga	6 valores com os valores do regulador de carga	64
0x43	Pedido de informação referente ao carregador	8 valores com os valores do carregador	61

Tabela 4.8: Descrição do pacote de resposta ao pedido 0x42

Bytes	Descrição	Unidades
1 – 12	Tensão principal da bateria	mV
13 – 24	Corrente da bateria	mA
25 – 36	Tensão produzida pelo painel fotovoltaico	mV
37 – 48	Potência produzida pelo painel fotovoltaico	W
49 – 51	Estado de operação	
52 – 63	Corrente para a carga	mA
64	Fim	

Tabela 4.9: Descrição do pacote de resposta ao pedido de informação de estado.

Resposta	Descrição
00	Estado EMPTY
11	Estado CENTERING
12	Estado OPENING
14	Estado HOME
21	Estado DETECT
22	Estado POLARITY
23	Estado GET_BMS
30	Estado WORKING
41	Estado GET_MPPT
42	Estado GET_IMAX
43	Estado CHECK_BATT
44	Estado CHECK_PARM
45	Estado START_CHARGING
46	Estado VERIFY_CHARGING
47	Estado CHARGING
48	Estado FINISH
96	Estado desconhecido geral
97	Estado desconhecido da máquina de estado principal
98	Estado desconhecido da máquina de estado SAM
99	Estado desconhecido da máquina de estado do processo de carregamento

terminal ";" (0x3B). O tamanho dos pacotes de resposta depende do tipo de pedido, contudo, todos os pacotes terminam com o byte "-" (0x2D). O pacote de resposta ao pedido 0x30 segue o mesmo protocolo da Figura 5.6. O pacote de resposta ao pedido 0x41 é constituído por 3 bytes sendo 2 bytes informativos do estado em que se encontra o DronePort (cf. Tabela 4.9). Quando o pedido realizado solicita informação do regulador de carga (0x42) é respondido com um pacote de 64 bytes contendo 6 valores. O pacote é encapsulado no formato da Figura 4.8 sendo cada byte separado por ";" (0x3B). Por fim o pedido 0x43 é respondido com um pacote de 61 bytes, cada byte separado por ";" (0x3B), terminando com o byte "-" (0x2D) (cf. Tabela 4.10).

4.3 *Software* de Monitorização

Com o intuito de visualizar o processo de carregamento do DronePort externamente foi desenvolvido um *software* recorrendo à plataforma Labview que permite dar ao utilizador todas as informações inerentes ao DronePort. O *software* está dividido em quatro módulos: Geral, BMS, MPPT e iMAX. O módulo Geral permite visualizar de forma rápida as variáveis

Tabela 4.10: Descrição do pacote de resposta ao pedido 0x43

Bytes	Descrição	Unidades
1 – 3	Número de células	
4 – 15	Corrente elétrica de carga programável	mA
16 – 18	Estado do menu	
19 – 21	Estado de operação	
22 – 33	Corrente elétrica instantânea	mA
34 – 45	Tensão elétrica instantânea	mV
46 – 57	Tensão elétrica de alimentação	mV
58 – 60	Polaridade	
61	Fim	

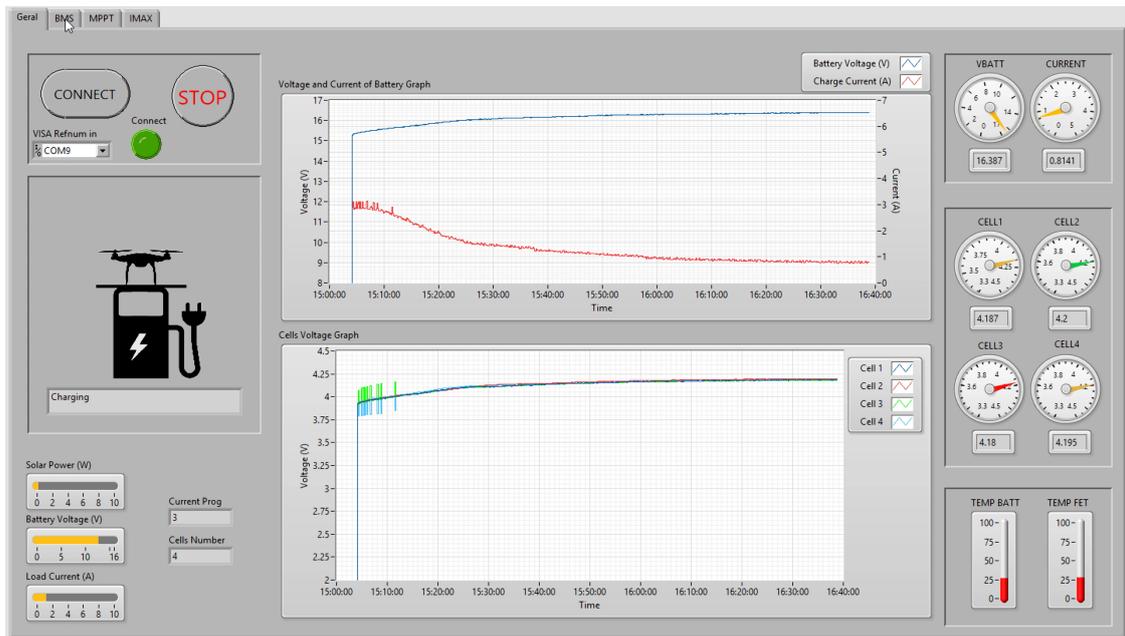


Figura 4.12: Visão do *software* - Módulo Geral

mais importantes do DronePort como: o estado em que se encontra; os valores das células; a corrente e tensão da bateria do UAV; a potência produzida; a corrente de carga e tensão da bateria principal (cf. Figura 4.12). No módulo BMS (cf. Figura E.2) é possível visualizar todos os registros de verificação, a temperatura do sistema, a tensão das células e da bateria do UAV e visualizar o processo de carga e equilíbrio ao longo do tempo. O módulo MPPT (cf. Figura E.3) permite visualizar as variáveis do regulador. É possível visualizar graficamente a tensão e a potência gerada pelo painel fotovoltaico e também a tensão e corrente da bateria principal. São dadas também informações do estado do regulador e da corrente de carga instantânea. Por fim existe o módulo iMAX (cf. Figura E.4) onde possibilita graficamente visualizar o processo de carregamento referenciado no tempo e também permite visualizar as configurações do carregador, como número de células e a corrente de carga programável.

5 UAV

Tomando como fundamental o desenvolvimento de um sistema apto para uma grande variedade de UAVs o *hardware* desenvolvido deve proporcionar a mínima adaptabilidade da estrutura onde a dependência entre os módulos desenvolvidos e o UAV de ser minimizada.

Este capítulo descreve a implementação de *hardware* e *software* no UAV onde são comparado vários sensores e diferentes soluções que permitem a recarga através do DronePort.

5.1 *Hardware*

Como resultado final do desenvolvimento do módulo do sistema de alimentação do UAV, todos os elementos foram interligados através de um microcontrolador STM32F103RB (cf. Anexo B) originando um módulo capaz de comunicar com o DronePort através do módulo nRF24L01 e equilibrar as células da bateria numa etapa de carregamento. Em suma, este desenvolvimento conduziu às especificações representadas na Tabela 5.1.

Nas seguintes secções é detalhado o desenvolvimento dos diferentes elementos que compõem o módulo do sistema de alimentação do UAV e os sensores externos que foram integrados no módulo de controlo de movimento.

Tabela 5.1: Especificações do módulo UAV.

Número de células	3 - 8
Corrente de carga máxima	7 A
Corrente de equilíbrio	100 mA
Tipo de posicionamento	Visão e LIDAR ¹
Tipo de transferência de energia	Contacto físico
Comunicação	Sem fios 2.4 GHz
Extra	Deteção de estado

Tabela 5.2: Tabela comparativa de vários circuitos integrados de BMS.

Fabricante	Intersil			Texas	Linear
Produto	ISL94203	ISL94208	ISL94212	BQ77PL900	LTC6804
Número de células	3 - 8	4 - 6	6 - 12	5 - 10	2 - 12
Circuito de equilíbrio	Externo	Interno (60mA)	Externo	Interno (60mA)	Externo
Autônomo	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Comunicação	I2C ²	I2C	I2C	I2C	SPI ³

5.1.1 Sistema de Gestão de Baterias

Para o desenvolvimento do BMS é necessário ter em conta as especificações referentes à bateria e ao próprio consumo do UAV como por exemplo, o tipo de bateria usado, o número de células, a capacidade da bateria e as taxas de carga. Da Tabela 3.1 conclui-se que o BMS terá de ser capaz de se adaptar a várias especificações, no entanto, outros aspetos como perdas por efeito de Joule terão de ser tomadas em conta no desenvolvimento. De forma a tornar o sistema mais eficiente e a assegurar as proteções necessárias à bateria, realizou-se uma pesquisa de soluções comerciais que suprimissem as nossas necessidades. Existe no mercado uma variedade de circuitos integrados de vários fabricantes que fornecem suporte às funcionalidades de um BMS incorporando sistemas de proteção contra sobretensão, corrente excessiva, temperaturas elevadas, entre outros. Alguns deste IC são autónomos, incorporam o circuito de equilíbrio ou estão limitados no número de células que conseguem monitorizar. Na Tabela 5.2 estão representadas algumas soluções possíveis para o desenvolvimento do BMS. Optou-se por usar o IC ISL94203 do fabricante Intersil uma vez que: o número de células se ajusta às nossas especificações; é possível obter *feedback* dos valores medidos e por ultimo não possui o circuito de equilíbrio interno, fator este que seria um potencial gerador de calor no IC.

A Figura 5.1 representa um diagrama de uma possível forma de aplicar este circuito integrado para monitorizar e equilibrar as múltiplas células da baterias. Do lado esquerdo temos representadas múltiplas células da bateria ligadas a um circuito de equilíbrio externo. No topo está demonstrado o circuito de corte interligando, pelas linhas grossas, a bateria ao carregador. Ligado às portas TEMPO, xT_1 , xT_2 é representado o circuito que monitoriza a temperatura da bateria e a temperatura dos MOSFETS de corte. O esquema detalhado pode ser confrontado no Anexo A.1.

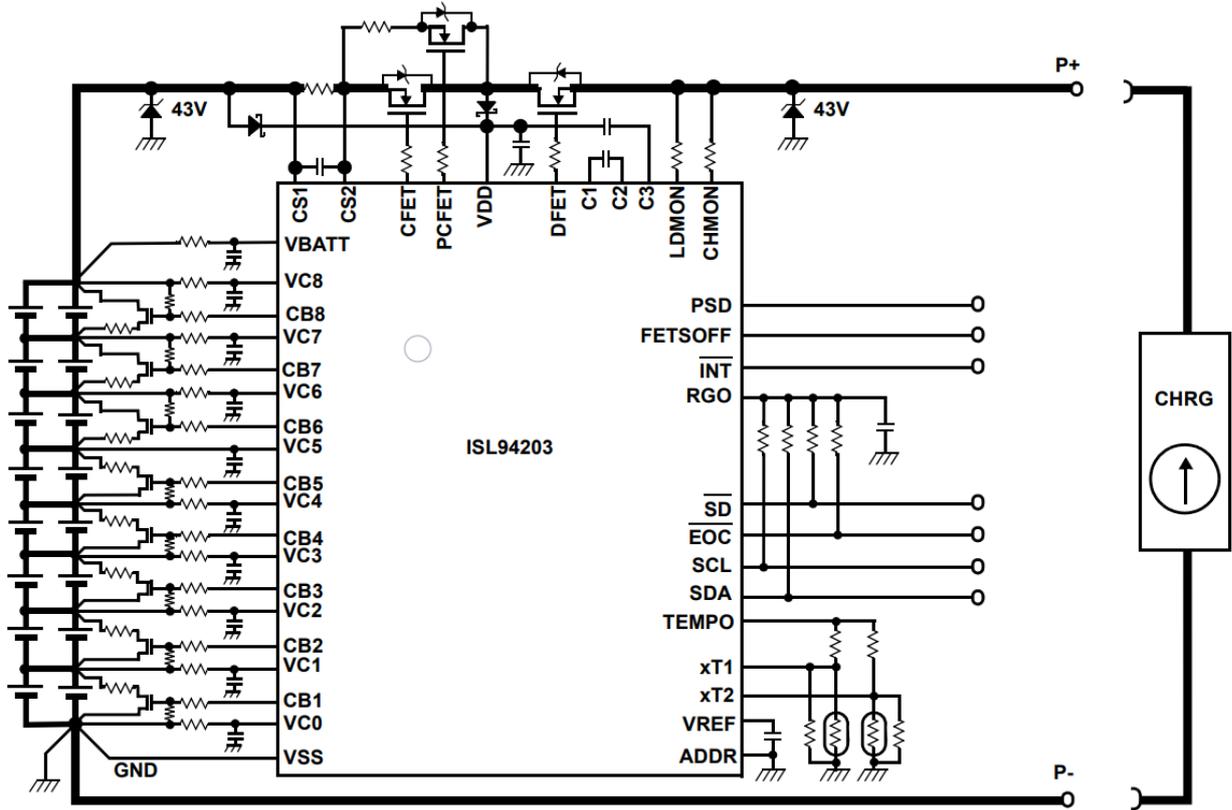


Figura 5.1: Diagrama de aplicação típico do IC ISL94203.

Circuito de Equilíbrio

O dimensionamento do circuito de equilíbrio requer uma corrente máxima de equilíbrio predefinida. Esta corrente elétrica é importante para um rápido equilíbrio da célula, contudo, é necessário ter um compromisso entre a dimensão do circuito e a potências no circuito de equilíbrio. Optou-se por usar o tipo de equilíbrio ativo através do método *Cell-to-Cell* [44] devido ao custo e eficiência que proporciona. Foi definida uma corrente de equilíbrio máxima (I_{max}) de 100 mA o que conduziu a escolha de um MOSFET tipo-N FDN359AN e um MOSFET tipo-P FDN5618P devido ao seu reduzido $R_{DS(on)} < 60m\Omega$.

A corrente de equilíbrio pode ser regula pela resistência R_4 do circuito da Figura 5.2. A resistência R_4 relaciona-se com a corrente I_{max} através da equação:

$$I_{max} = \frac{V_{cell}}{R_{DS(on)} + R_4} \quad (5.1)$$

sendo $R_{DS(on)} \ll R_4$, $R_{DS(on)}$ pode ser desprezado para fins de calculo:

$$R_4 = \frac{V_{cell}}{I_{max}} = \frac{4.2}{0.1} = 42 \Omega \quad (5.2)$$

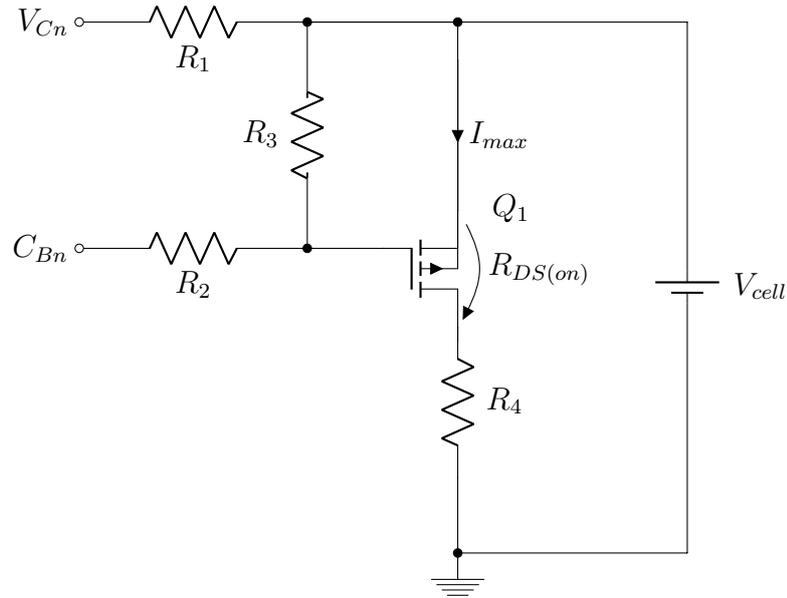


Figura 5.2: Circuito simplificado de equilíbrio de uma célula.

A potência dissipada pelo MOSFET deve ser inferior a 0.5 W limitado pelo seu encapsulado. Assim, através da equação 2.1 com uma corrente de equilíbrio $I = 100\text{ mA}$ e uma resistência $R = R_{DS(on)}$ a potência dissipada é:

$$P_{mosfet} = 0.1^2 \cdot 0.06 = 600\ \mu\text{W} \quad (5.3)$$

demonstrando o correto dimensionamento. Outro facto importante no dimensionamento é a potência dissipada na resistência R_4 :

$$P_{R_4} = 0.1^2 \cdot 42 = 420\text{ mW} \quad (5.4)$$

valor este necessário na escolha da potência da resistência usada.

Analisando o circuito desenvolvido (cf. Anexo A.2) este só suporta baterias até 4 células. Esta especificação ocorre por ter sido o ponto de partida para o desenvolvimento do BMS mas devido a limitações temporais no decorrer da dissertação não foi possível reconstruir o BMS para suportar a totalidade de células.

Circuito de Corte

O circuito de corte é responsável pelo isolamento entre a bateria e o carregador. O comportamento dos dois MOSFETS de corte é baseada em medições das tensões das células da bateria, de medições da corrente e em deteções em tempo real. A configuração dos

MOSFETS permite, através do fluxo de corrente e de testes realizados pelo IC ISL94203, determinar em que condição se encontra o sistema que pode corresponder ao estado vazio, estado de carga ou estado de descarga.

A escolha dos MOSFETS de corte recaiu sobre o IRFS7534 (cf. Anexo A.3) devido à elevada corrente de *drain* (I_D) e conseqüentemente baixa resistência *drain-source* ($R_{DS(on)}$). Este possuem um $R_{DS(on)} < 1.96 \text{ m}\Omega$ proporcionando uma baixa perda por efeito de Joule. Por exemplo estipulando uma corrente de carga máxima de 10 A obtemos uma potência dissipada de:

$$P_{corte} = 10^2 \cdot 1.96^{-3} = 196 \text{ mW} \quad (5.5)$$

esta inferior à potência máxima suportada.

Este circuito integrado permite equilibrar as células num processo de descarga contribuindo para um melhor desempenho da bateria. Este método pode contribuir favoravelmente para o aumento da autonomia do UAV, no entanto, esta contribui para uma possível falha crítica na alimentação do UAV. Esta falha pode ocorrer numa falha no controlo do circuito de corte podendo abrir o circuito entre a bateria e o UAV, situação crítica quando o UAV se encontra em operação. Assim foi delimitado o equilíbrio das células ao estado de carga.

5.1.2 Transferência de Energia Elétrica

O método utilizado para se conseguir transferir energia elétrica do DronePort para o UAV foi o método por contacto físico permitindo assim garantir a máxima eficiência do sistema. Dois dos quatro pés de apoio do UAV (cf. Figura 5.3) correspondentes à mesma diagonal possuem contactos metálicos permitindo a ligação com a base de carregamento.

5.1.3 Detecção de Estado do UAV

De forma a tornar os módulos do sistema de alimentação do UAV independentes dos restantes módulos optou-se por usar um sensor externo que permita detetar o estado do UAV (em operação ou em repouso). Este requisito permite à plataforma conhecer o estado do UAV, condição necessária para iniciar todo o processo de carregamento e controlar o transmissor/recetor de comunicação. A necessidade de controlar o transmissor/recetor de comunicação deve-se ao facto da frequência de operação, 2.4 GHz , coincidir com a frequência do recetor do controlo remoto podendo originar comportamentos indesejados no UAV em caso de interferência. Assim, através de um microfone colocado na estrutura do UAV, é

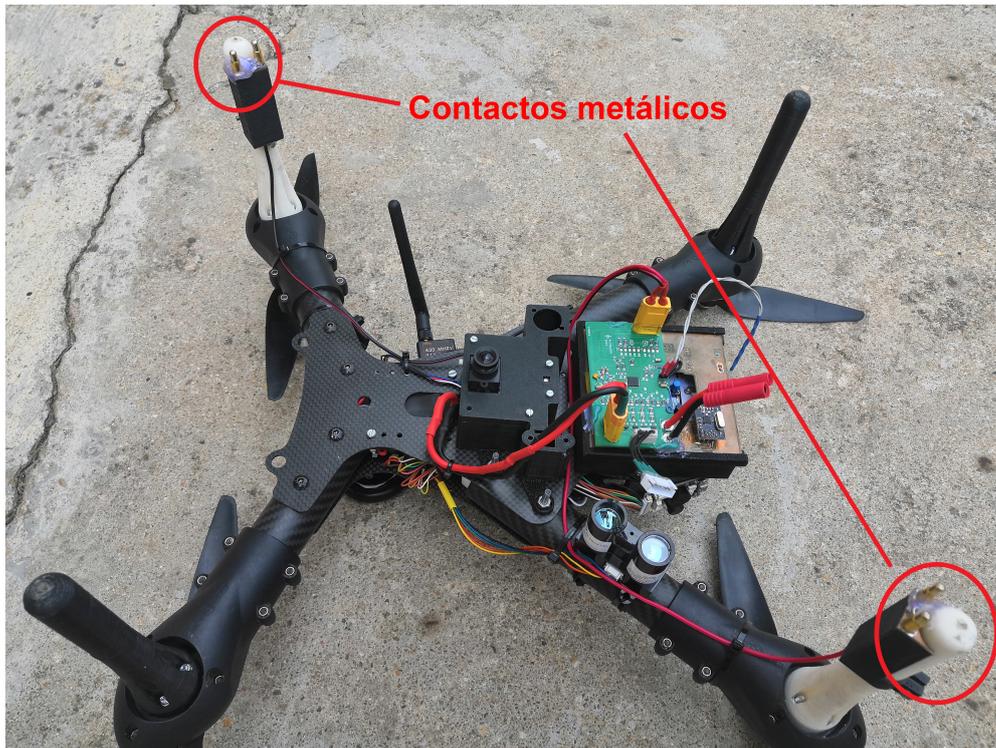


Figura 5.3: Contactos metálicos para transferência de energia e sua disposição.

detetada a rotação dos motores permitindo detetar o estado do mesmo.

5.1.4 Sensores de Aterragem de Precisão

Existem várias soluções no mercado, referidas no Capítulo 2, que permitem realizar a aterragem com exatidão. Como requisito a solução deverá ser capaz de operar em qualquer condição luminosa e permitir uma boa exatidão. Optou-se pelo uso da tecnologia de visão onde o sistema desenvolvido pela IR-LOCK através de uma câmara consegue detetar uma imagem ou um ponto luminoso permitindo alinhar o UAV com a respetiva referência. Em comparação com sensores de geolocalização esta permite uma melhor exatidão e oferece um custo mais reduzido em comparação com outras tecnologias.

Para se obter uma aterragem com exatidão é necessário efetua-la suavemente, assim foi necessário estudar mecanismos que conduzam a este requisito. Para tal recorreu-se à tecnologia de medição de distâncias baseadas no tempo de voo de uma onda sonora ou luminosa permitindo medir a distância do UAV à plataforma.

Câmara

O sistema da IR-LOCK⁴ é um dispositivo de rastreamento infravermelho desenvolvido para UAVs e robótica. O sensor IR-LOCK é uma câmara com um MCU de elevado desempenho que consegue localizar e seguir um ponto luminoso, neste caso um ponto luminoso infravermelho. A escolha de um ponto luminoso através de luz infravermelho conduz a muitos bons resultados em muitas condições luminosas externas principalmente em condições ambientais de pouca luminosidade.

Sensor de Altitude

Para suavizar a aterragem do UAV, foram estudados três sensores: MaxBotic MaxSonar-EZ4; STM VL53Lx e Garmin Lidar-Lite V3, usados para medir distâncias através do tempo de voo de uma onda. A escolha final recaiu sobre o Lidar Lite V3 do fabricante Garmin devido aos resultados apresentados e a uma maior compatibilidade com o sistema da IR-LOCK.

- **MaxBotic MaxSonar-EZ4**⁵ - Este sensor foi desenvolvido pela MaxBotic e permite medir através de uma onda acústica emitida a $42kHz$ distâncias a um objeto. A gama de valores de medição está compreendida entre 20 cm e 700 cm com uma resolução de 1 cm. Estas especificações são aceitáveis para a aplicação destinada, contudo, as altas vibrações produzidas pelos motores do UAV afetam consideravelmente as medições do sensor impossibilitando a sua aplicação.
- **STM VL53L0X**⁶ - VL53L0x da STM é um sensor de dimensões reduzidas onde através do tempo entre a emissão de um pulso luminoso laser e a sua receção permite medir a distância a um objeto. Esta tecnologia não depende do coeficiente de reflexão do objeto aumentando a precisão das medidas. A limitação deste sensor passa pela sua curta gama de deteção não sendo superior a 2 m. Existe no mercado um modelo que permite um alcance máximo de 4 metros, mas não foi possível testar durante a realização desta dissertação.
- **Garmin Lidar-Lite V3**⁷ - Intitulado como sensor ótico de alto desempenho para medições de distâncias, o Lidar-Lite V3 da Garmin é um sensor de proximidade e de alcance, fiável e potente, para aplicações em UAVs, robôs ou veículos não tripulados.

⁴IR-LOCK - <https://irlock.com/>

⁵MaxBotix Sonar - https://www.maxbotix.com/Ultrasonic_Sensors/MB1242.htm

⁶STM VL53L0X - <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>

⁷Garmin Lidar Lite V3 - <https://buy.garmin.com/pt-PT/ES/p/557294>

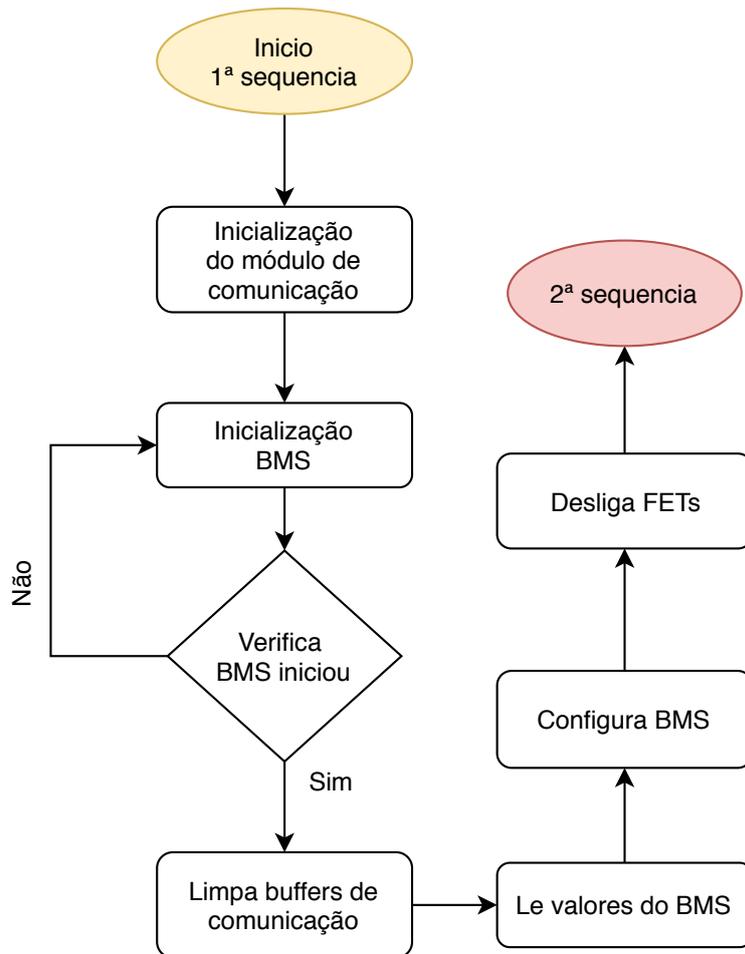


Figura 5.4: Fluxograma do *firmware* da primeira sequencia do módulo UAV.

Utilizando a tecnologia laser permite medir distancias a objetos numa gama entre os 5 centímetros e 40 metros com uma precisão de 2,5 centímetros. Este sensor é completamente compatível com o sensor de posicionamento o que originou bons resultados finais.

5.2 Software

O módulo do sistema de alimentação do UAV é constituído por um MCU, um BMS, um microfone e um módulo de comunicação obrigando a criar-se uma estrutura funcional que permita estabelecer uma comunicação entre os diferentes elementos e que possibilite comunicar com o DronePort. O *firmware* está dividido em duas sequências: a sequência de inicialização e a sequência de operação, onde esta só se concretiza caso a sequência de inicialização ocorra com sucesso.

A sequência de inicialização (cf. Figura 5.4) consiste num conjunto de verificações de estado que permite a sequência de operação se concretizar sem erros. Prevenindo erros

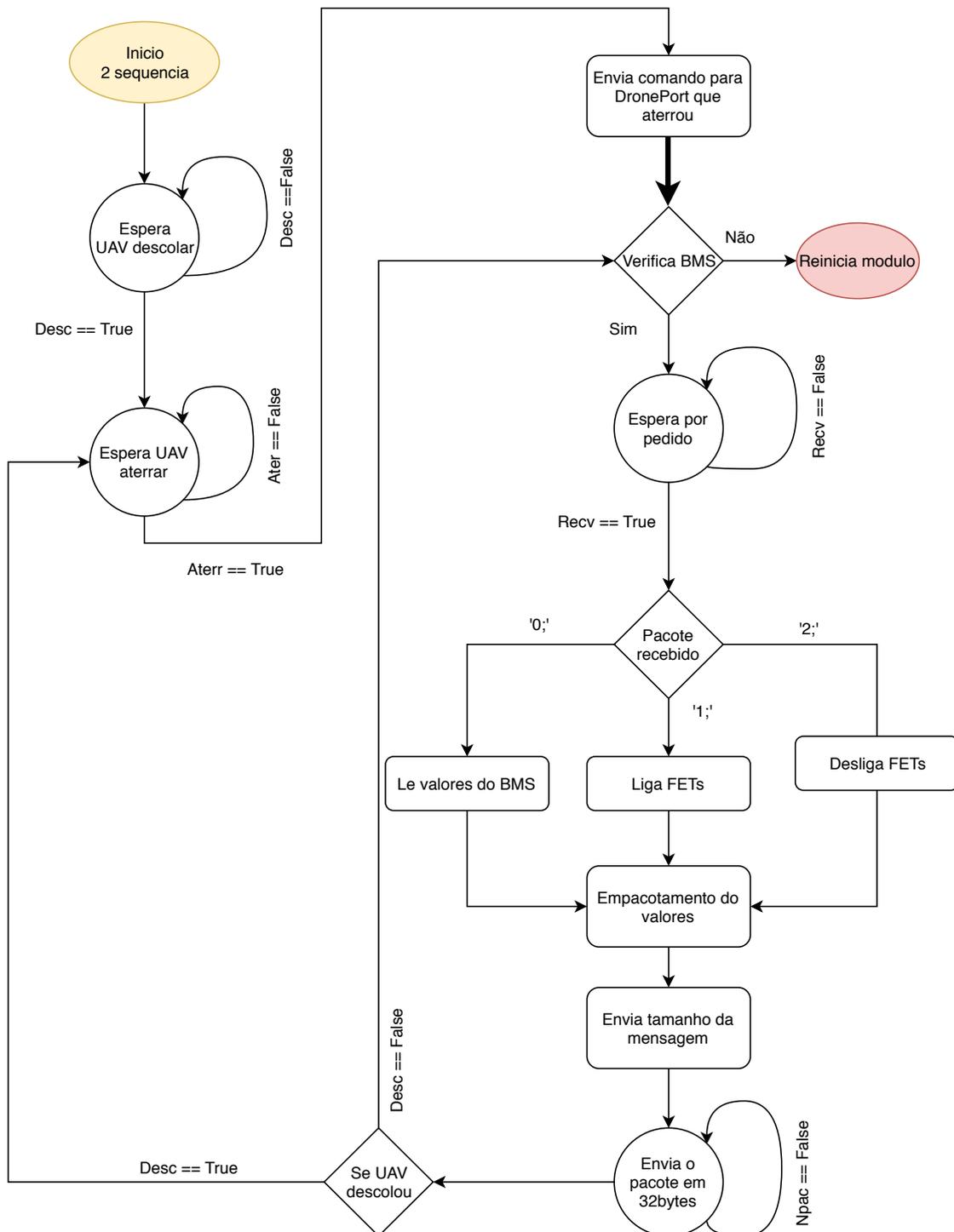


Figura 5.5: Fluxograma do *firmware* da segunda sequencia do módulo UAV.

inesperados no BMS, é realizado sempre que se inicia o módulo a configuração dos parâmetros deste para os valores estipulados para o UAV como por exemplo o número de células, os limites de proteção, entre outros. Por último é desativado os MOSFETS de corte do BMS prevenindo a ocorrência de curto-circuito ao aterrar na plataforma.

A segunda sequência comporta-se como uma máquina de estado com três estados: espera descolar, espera aterrar e espera pedido, visível na Figura 5.5. O primeiro estado, depois do módulo ter sido inicializado espera que ele inicie uma descolagem, detetado pelo microfone. Esta deteção ocorre através do ruído dos motores em rotação o que fará elevar a tensão acima de um determinado limiar. Este sinal é adquirido pelo ADC do MCU onde através de uma média dos últimos valores verifica se a condição de descolagem é verdadeira. O segundo estado é o inverso do primeiro, verificando se o sinal produzido pelo microfone está abaixo de um limiar. Após o segundo estado módulo inicia uma transferência de dados com o DronePort informando que a aterragem foi concluída. Enquanto o processo de carga decorre é verificado ciclicamente o estado do BMS, pois caso a verificação não ocorra com sucesso indicará uma falha no sistema sendo necessário reiniciar todo o módulo. Após todas as verificações estarem corretas o módulo aguarda um pedido de ação. Por fim é verificado se o UAV descolou permitindo retornar ao segundo estado.

Foi desenvolvida uma biblioteca para microcontroladores da STM para o IC ISL94203 que permite fazer a escrita e leituras no IC através de comunicação I_2C .

5.2.1 Comunicação com o DronePort

De forma a responder ao pedido realizado pelo DronePort o módulo permite três tipos de pedido (cf. Tabela 5.3). Os pedidos são terminados pelo carácter ";"(0x3B) e todas as respostas são terminadas por "-"(0x2D), permitindo verificar erros na transmissão de informação. A falta de resposta a um pedido num intervalo de tempo é considerada perda de informação e é aguardado um novo pedido de ação. Devido ao nRF24L01 ter um limite de 32 bytes por pacote enviado, é necessário repartir o pacote do pedido 0x30 em sub-pacotes e enviar de forma sequencial. O controlo e ordenação dos pacotes é realizada pelo módulo de comunicação não sendo necessário incluir informação extra no pacote. Este (cf. Figura 5.6) é constituído por 139 *bytes* onde inclui 4 *bytes* de identificação do UAV e 88 *bytes* correspondente aos registos do BMS separados pelo carácter ";" (0x3B).

Tabela 5.3: Descrição do pacote de pedido e resposta do módulo UAV

Pedido	Ação	Resposta	Bytes
0x30	Lê valores do BMS	46 valores com os valores do BMS e identificador do UAV	139
0x31	Liga MOSFETS de corte	‘OK-‘	3
0x32	Desliga MOSFETS de corte	‘OK-‘	3

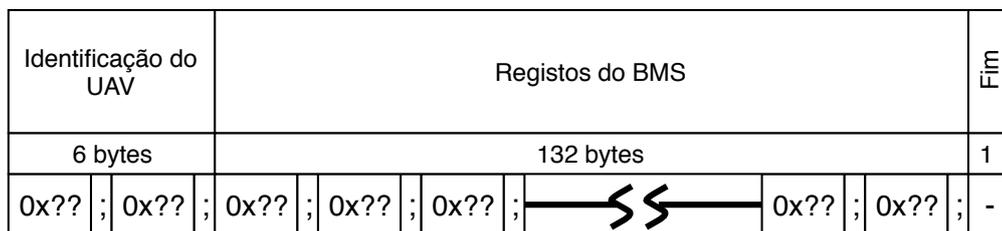


Figura 5.6: Estrutura do pacote de dados enviado para o pedido 0x30.

6 Testes e Resultados

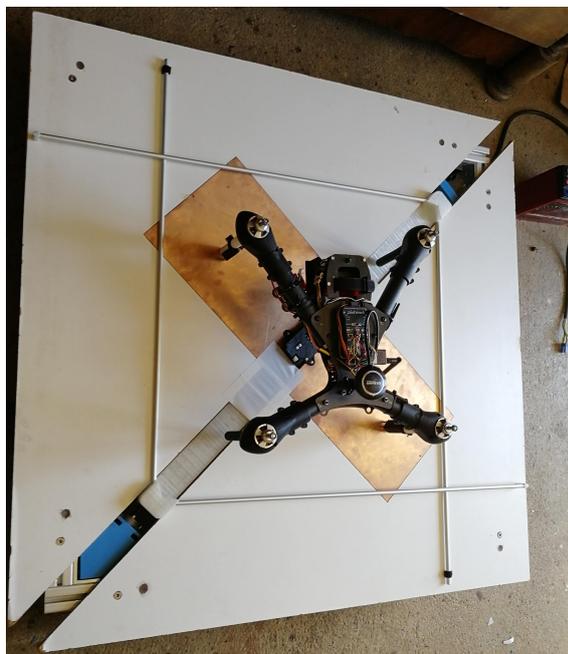
Neste capítulo são apresentados os testes realizados com o sistema desenvolvido e é feita uma análise do seu desempenho. Foram realizados dois tipos de teste permitindo analisar e caracterizar o sistema de forma modular. Os testes de precisão de aterragem do UAV no DronePort e o seu respetivo alinhamento é apresentado na secção 6.1 e a etapa de carregamento é analisada na secção 6.2.

6.1 Precisão e alinhamento

A aterragem de precisão é realizada através de um sistema de deteção ótico e um ponto luminoso infravermelho através do módulo da IR-LOCK. No sistema de posicionamento existe também um mecanismo de alinhamento mecânico que proporciona a centralização do UAV. Os dois sistemas foram testados em conjunto em campo aberto e sem qualquer interação com o operador permitindo analisar o comportamento do UAV e do DronePort. Existindo fatores externos, como o vento, que influenciam os resultados. Todos os testes foram realizados em dias semelhantes, com clima seco e com céu limpo permitindo realizar uma análise mais criteriosa, foram realizados dez testes de aterragem e alinhamento em três períodos do dia, 15h às 16h, 17h às 18h e 20h às 21h. Cinco dos dez testes foram realizados iniciando o UAV a uma altitude relativa à plataforma de 10 metros e os restantes a 20 metros. O sucesso do teste ou uma boa exatidão de aterragem é validado quando o UAV aterra de forma autónoma e dentro dos limites da plataforma, já o teste de alinhamento é validado quando o UAV fica, no mínimo, a fazer contanto elétrico com as bases da plataforma. Com a realização do primeiro banco de testes foi perceptível a necessidade de melhorar a exatidão da aterragem e do alinhamento mecânico. Da Tabela 6.1 é possível visualizar uma influência direta da radiação solar influenciando negativamente o desempenho. Uma vez que a diferença entre as altitudes não influencia os resultados obtidos concluiu-se que o sensor ótico poderia estar saturado devido à radiação refletida. Analisando o sistema usado neste

Tabela 6.1: Percentagens de sucesso de aterragem e alinhamento do primeiro banco de testes

Período do Dia	Aterragem a 10 metros	Aterragem a 20 metros	Alinhamento
15h - 16h	40 %	40 %	60 %
17h - 18h	60 %	60 %	83 %
20h - 21h	60 %	80 %	71 %



(a)



(b)

Figura 6.1: (a) Plataforma com base em branco. (b) Plataforma com base em preto.

banco de teste, a plataforma da Figura 6.1a contém uma grande área exposta de cor branca e o emissor de infravermelho estava protegido através de uma caixa pouco exposta (cf. Figura 6.2a). A existência de uma área exposta de cor branca implica uma grande quantidade de raios infravermelhos refletidos o que poderá provocar uma saturação na câmara no UAV impossibilitando-o de detetar a plataforma de forma correta. A fiabilidade do sistema de alinhamento não é elevada, contudo, este problema está relacionado com atritos e com os limites de força definidos. A diminuição da taxa de sucesso no alinhamento correspondente ao ultimo período deve-se à descarga da bateria local aumentando o erro da deteção da força.

Na tentativa de melhorar os resultados foi realizado um segundo banco de teste, estes utilizando uma base em cor preto (cf. Figura 6.1b) e reformulando a caixa de proteção do emissor infravermelho (cf. Figura 6.2b). A realização destas alterações conduziu a melhores resultados (cf. Tabela 6.2), onde se constata uma diminuição da radiação solar refletida produzindo assim um incremento na exatidão, facto este, melhorado aquando da realização da aterragem a uma altitude de 20 metros. Depois de se reduzirem os atritos, a fiabilidade

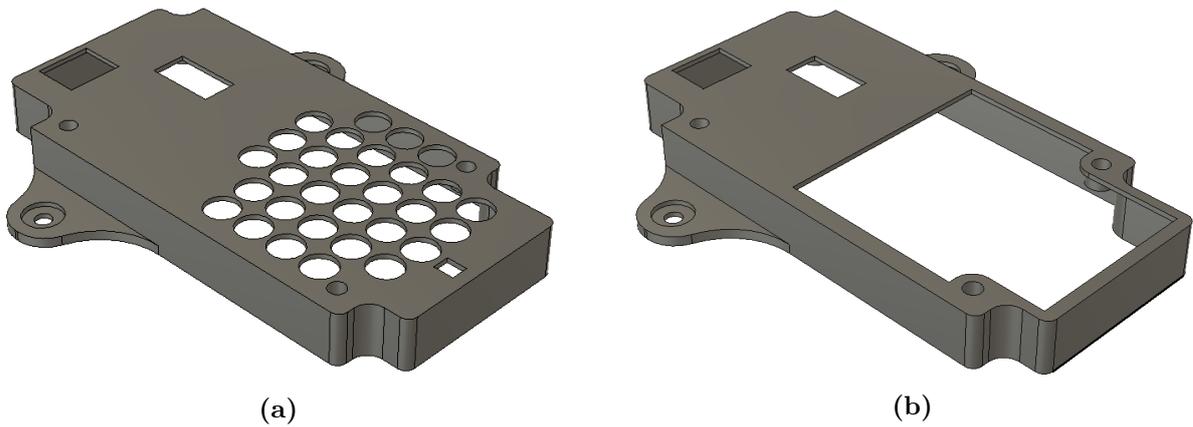


Figura 6.2: (a) Caixa de proteção do emissor infravermelho versão 1. (b) Caixa de proteção do emissor infravermelho versão 2.

Tabela 6.2: Percentagens de aterragem e alinhamentos com sucesso do segundo banco de testes

Período do Dia	Aterragem a 10 metros	Aterragem a 20 metros	Alinhamento
15h - 16h	60 %	80 %	100 %
17h - 18h	60 %	100 %	88 %
20h - 21h	80 %	100 %	100 %

do sistema de alinhamento mecânico aumentou cerca de 30% atingindo uma taxa de sucesso superior a 96%.

Em suma, o sistema de aterragem consegue ter uma taxa de sucesso superior a 90%, no entanto, caso o sistema não detete numa primeira instância a fonte luminosa a aterragem não ocorre com sucesso. Este facto deve-se a uma insuficiência luminosa da fonte emissora. O sistema de alinhamento mecânico conseguiu realizar com sucesso mais de 96% dos teste demonstrando a alta fiabilidade do sistema.

6.2 Teste de Carregamento

A realização de testes isolados de carregamentos permitiu analisar de forma controlada a temperatura da bateria e dos MOSFETS de corte, a duração da recarga com diferentes taxas de carga, a ocorrência de erros no BMS e no DronePort e visualizar o correto carregamento nas suas diferentes etapas.

Foram realizados dois testes a diferentes taxas de carga (0.5 C e 0.8 C), iniciando o carregamento com uma tensão elétrica aos terminais da bateria de 14.5 V no primeiro teste e 15.2 V no segundo teste.

Dos testes realizados (cf. Figura 6.3 e Figura 6.4) é possível observar o correto carrega-

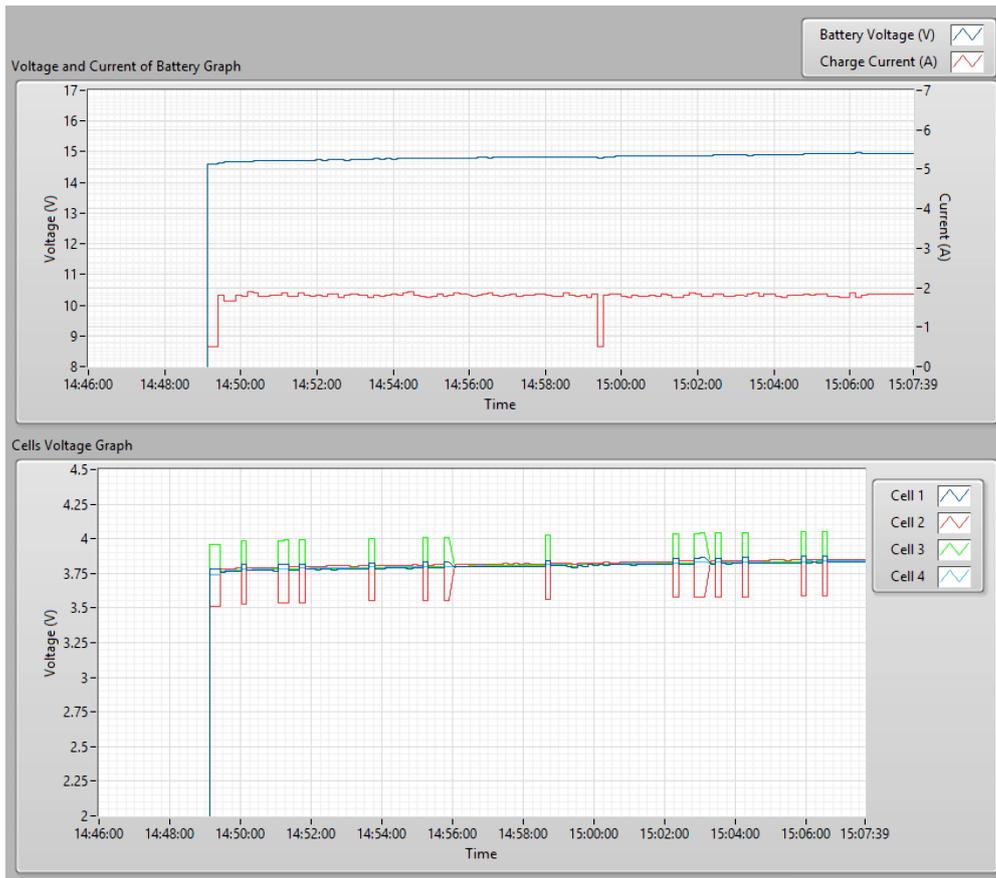


Figura 6.3: Gráfico de carga a $0.5 C$ ($1.8 A$).

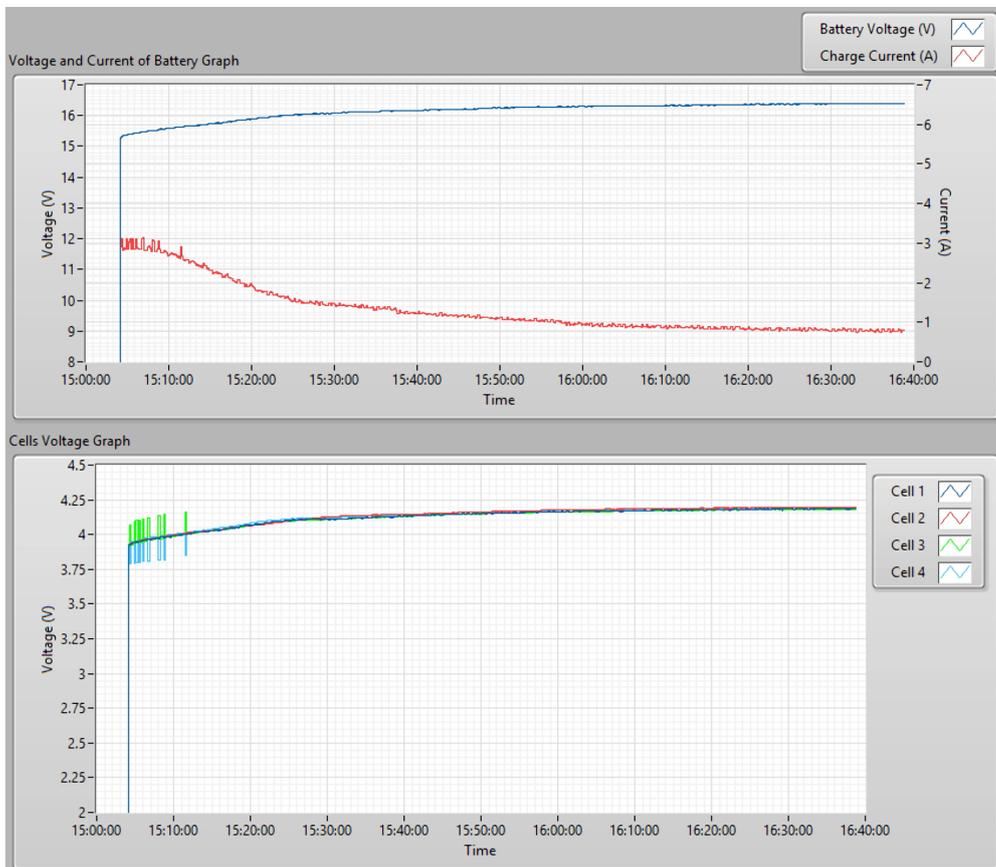


Figura 6.4: Gráfico de carga a $0.8 C$ ($3 A$).

mento onde é visível as duas etapas de carga. Numa primeira fase é realizado o equilíbrio, contudo, este só acontece enquanto houver células com uma tensão inferior a 4 V permitindo salvar a ocorrência de sobretensão. A temperatura da bateria e dos MOSFETS de corte apresentam valores seguros quando em operação, concluindo-se o bom dimensionamento. No primeiro teste as temperaturas não subiram além dos 27 °C e no segundo teste aumentou para 30 °C a 32 °C motivado pelo aumento de potência.

Foi realizado um terceiro teste a uma taxa de carga de 1.2C (4.5A) onde ocorreu um erro crítico reportado pelo DronePort. Foi detectado uma deficiência energética no carregador iMAX B6 o que ocasiona uma interrupção no processo de carga. Com o decorrer do carregamento da bateria do UAV a tensão da bateria local do sistema decaiu para um nível inferior ao permitido pelo iMAX (cf. Figura E.3 - intervalo 15:05:00 a 15:10:00), produzindo um erro no DronePort e conseqüentemente a falha no carregamento.

7 Conclusão

Na presente dissertação, foi proposto desenvolver uma estação de carga que permitisse aumentar a autonomia energética de um UAV de decolagem vertical. Foram descritas múltiplas soluções que permitem aumentar a autonomia energética. Foram analisadas as especificações, as vantagens e desvantagens de cada uma delas, o que conduziu ao desenvolvimento de uma plataforma de carregamento. O desenvolvimento focou-se na plataforma de carregamento permitindo estudar quais as limitações e as necessidades que são fundamentais para obter um sistema robusto e que permita uma grande variedade de UAVs. Foi também implementado um sistema de geração de energia elétrica local através de um sistema fotovoltaico.

A plataforma é constituída por módulos de carregamento inteligentes, sistemas de posicionamento e alinhamento mecânico, meios de comunicação como o UAV e um sistema de geração de energia. O conjunto permite albergar UAVs de tamanho 450mm a 680mm o que corresponde à grande parte dos UAV para fins profissionais. De forma a que a estrutura do UAV não necessite de ser adaptada foi incorporado na plataforma um sistema de alinhamento mecânico. O módulo de carregamento inteligente permite uma grande variedade de especificações de baterias em UAVs onde permite realizar carregamentos até 5A suportando baterias de no máximo até 6 células. A plataforma é constituída por sistemas de comunicação permitindo realizar troca de informação com o UAV e com o exterior abrindo portas a desenvolvimentos de software de monitorização e interligação entre diversas estações.

De forma a permitir uma maior adaptabilidade dos UAVs foi desenvolvido um módulo que permite controlar e monitorizar o estado do carregamento da bateria assegurando a segurança do UAV. Este sistema acrescenta 200g ao peso total do UAV e não necessita de ligações entre o UAV e o módulo, tornando-se um sistemas independente.

Em suma, com o desenvolvimento desta dissertação conseguiu-se concluir com êxito os pressupostos, criando o ponto de partida para uma estação de carga completa e de baixo custo. Contudo não foi possível realizar testes em modo de operação automático devido a

uma incompatibilidade do sensor de posicionamento ótico com a controladora do UAV.

7.1 Trabalhos Futuros

Apesar de a plataforma funcionar corretamente, existem varias melhorias que podem ser realizadas como trabalho futuro.

A secção mais critica é o carregador inteligente iMAX B6, pois o baixo intervalo de tensão de alimentação compromete o carregamento em situações críticas. Este problema pode ser resolvido alterando o carregador para um com melhores especificações ou tentando modificar o carregador de forma a suportar tensões de alimentação superiores.

Mesmo com as melhorias nos testes do sensor de posicionamento ótico referido no Capítulo 6.1 nota-se uma falta de insuficiência luminosa o que pode ser facilmente corrigida mudando a quantidade e alterando a disposição da fonte.

Como referido no Capítulo 5.1.1 o BMS tem capacidade para equilibrar até 8 células, contudo o sistema foi limitado para operar em 4 células o que limita a aplicação em vários UAVs. Como trabalho futuro será interessante modificar o BMS para operar na sua totalidade visto que o sistema está preparado para tal. Aproveitando esta proposta, seria interessante também desenvolver todo o módulo a uma escala mais reduzida permitindo melhorar a compatibilidade com os UAVs.

Finalmente, os algoritmos implementados na plataforma começam a ter uma complexidade elevada havendo necessidade de migrar para sistemas operativos de tempo real (RTOS¹) melhorando o desempenho e o tempo de resposta entre varias plataformas.

¹RTOS - *Real Time Operating System*

Bibliografia

- [1] PORTLAND, “Commercial Drones Market Expected to Reach \$10,738 Million by 2022,” 2018. [Online]. Available: <https://www.prnewswire.com/news-releases/commercial-drones-market-expected-to-reach-10738-million-by-2022-684281541.html>
- [2] Li Dongmei, “Chinese Drone Maker DJI Said Raising \$1B At \$15B Valuation – China Money Network,” 2018. [Online]. Available: <https://www.chinamoneynetwork.com/2018/04/06/chinese-drone-maker-dji-said-raising-1b-at-15b-valuation>
- [3] G1, “Amazon testa drones para agilizar entregas,” 2013. [Online]. Available: <http://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2013/12/amazon-testa-drones-para-agilizar-entregas.html>
- [4] G. Cai, J. Dias, and L. Seneviratne, “A Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends,” *Unmanned Systems*, vol. 02, no. 02, pp. 175–199, 2014.
- [5] Y. Li and L. Zhen, “Battery Management System,” *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, pp. 739–741, 2010.
- [6] Richtek Technology, “Li-ion Battery and Gauge Introduction.” [Online]. Available: <https://www.richtek.com/en/DesignSupport/TechnicalDocument/AN024>
- [7] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, and M. Chow, “Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles,” *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 7, no. June, pp. 4–16, 2013.
- [8] Q. Morales-Perryman and D. D. D. Lee, “Tethering System for Unmanned Aerial Vehicles,” pp. 1–7, 2013.
- [9] P. O’Brien, E. R. Goossen, and S. D. Martinez, “Tether energy supply system,” *US Patent App. 12/401,523*, 2011.

- [10] P. Desai, S. M. Faivre, and P. J. Zerillo, “Tethered drone assembly,” jun 2016.
- [11] M. Lombardini, J. Koehler, and R. Moarref, “Ground station and tether for unmanned aerial vehicles,” 2018.
- [12] L. Zikou, C. Papachristos, and A. Tzes, “The Power – over – Tether system for powering small UAVs : Tethering – Line Tension Control Synthesis,” *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pp. 681–687, 2015.
- [13] C. Papachristos and A. Tzes, “The Power – Tethered UAV – UGV Team : A Collaborative Strategy for Navigation in Partially – Mapped Environments,” *2014 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pp. 1153–1158, 2014.
- [14] D. D. Castro, I. Afonso, A. Prado, and M. Virg, “Modeling and Position Control of Tethered Octocopters,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 83, pp. 1–4, 2016.
- [15] S. Y. Choi, B. H. Choi, S. Y. Jeong, B. W. Gu, S. J. Yoo, and C. T. Rim, “Tethered aerial robots using contactless power systems for extended mission time and range,” *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2014*, pp. 912–916, 2014.
- [16] A. Noth, “Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight,” Ph.D. dissertation, 2008.
- [17] J. Meyer, J. A. F. Du Plessis, P. Ellis, and W. Clark, “Design considerations for a low altitude long endurance solar powered unmanned aerial vehicle,” *IEEE AFRICON Conference*, pp. 1–7, 2007.
- [18] X. Z. Gao, Z. X. Hou, Z. Guo, J. X. Liu, and X. Q. Chen, “Energy management strategy for solar-powered high-altitude long-endurance aircraft,” *Energy Conversion and Management*, vol. 70, pp. 20–30, 2013.
- [19] Jaw-Kuen Shiau, Der-Ming Ma, Pin-Ying Yang, Geng-Feng Wang, and Jhij Hua Gong, “Design of a Solar Power Management System for an Experimental UAV,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 4, pp. 1350–1360, 2009.
- [20] T. E. Noll, J. M. Brown, M. E. Perez-davis, S. D. Ishmael, G. C. Tiffany, and M. Gaier, “Investigation of the Helios Prototype Aircraft Mishap,” *Volume I Mishap Report*, vol. I, no. January, p. 100, 2004.

- [21] M. Simic, C. Bil, and V. Vojisavljevic, “Investigation in wireless power transmission for UAV charging,” *Procedia Computer Science*, vol. 60, no. 1, pp. 1846–1855, 2015.
- [22] K. A. Swieringa, C. B. Hanson, J. R. Richardson, J. D. White, Z. Hasan, E. Qian, and A. Girard, “Autonomous battery swapping system for small-scale helicopters,” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3335–3340, 2010.
- [23] D. Lee, J. Zhou, and W. T. Lin, “Autonomous battery swapping system for quadcopter,” *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2015*, pp. 118–124, 2015.
- [24] Z.-N. Liu, X.-Q. Liu, L.-J. Yang, D. Leo, and H.-W. Zhao, “an Autonomous Dock and Battery Swapping System for Multirotor UAV,” no. May, 2018.
- [25] H. M. C. W. B. Herath, H. M. S. Herath, S. W. Sumangala, O. D. Silva, and T. D. Latharatne, “Design and Development of an Automated Battery Swapping and Charging Station for Multirotor Aerial Vehicles,” no. Iccas, pp. 356–361, 2017.
- [26] S. G. Miller and J. S. Noorani, “Unmanned aerial vehicle battery swapping system,” 2017.
- [27] A. Williams, “Persistent Mobile Aerial Surveillance Platform using Intelligent Battery Health Management and Drone Swapping,” *2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, pp. 237–246, 2018.
- [28] B. Michini, T. Toksoz, J. Redding, M. Michini, J. How, M. Vavrina, and J. Vian, “Automated Battery Swap and Recharge to Enable Persistent UAV Missions,” *Infotech@Aerospace 2011*, no. March, 2011.
- [29] K. Fujii, K. Higuchi, and J. Rekimoto, “Endless flyer: A continuous flying drone with automatic battery replacement,” *Proceedings - IEEE 10th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing, UIC 2013 and IEEE 10th International Conference on Autonomic and Trusted Computing, ATC 2013*, pp. 216–223, 2013.
- [30] T. Gomes Carreira, “Quadcopter Automatic Landing on a Docking Station,” no. October, 2013.

- [31] H. Park, B. H. Y. Lee, and J. R. Morrison, “Persistent UAV security presence service: Architecture and prototype implementation,” *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2017*, pp. 1800–1807, 2017.
- [32] Y. Yu, S. Lee, J. Lee, K. Cho, and S. Park, “Design and implementation of wired drone docking system for cost-effective security system in IoT environment,” *2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics, ICCE 2016*, pp. 369–370, 2016.
- [33] H. Chae, J. H. Park, H. N. Song, Y. H. Kim, and H. W. Jeong, “The IoT based automate landing system of a drone for the round-the-clock surveillance solution,” *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, vol. 2015-Augus, pp. 1575–1580, 2015.
- [34] C. Song, H. Kim, Y. Cho, J. Kim, K. Jo, Y. Kim, and H. Moon, “Low EMI three phase wireless charger for drone with 150 degree conduction mode of VSI,” *2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology, ICWITS 2016 and System and Applied Computational Electromagnetics, ACES 2016 - Proceedings*, pp. 2–3, 2016.
- [35] C. W. Park and H. T. Chung, “A Study on Drone Charging System Using Wireless Power Transmission,” *International Journal of Trend in Research and Development*, vol. 3, no. 6, pp. 736–745, 2016.
- [36] T. Campi, F. Dionisi, S. Cruciani, V. De Santis, and M. Feliziani, “Magnetic Field Levels in Drones Equipped with Wireless Power Transfer Technology,” *7th Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, vol. 1, 2016.
- [37] M. Valenti, D. Dale, J. How, D. Pucci de Farias, and J. Vian, “Mission Health Management for 24/7 Persistent Surveillance Operations,” *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, no. August, 2007.
- [38] B. D. Song, J. Kim, J. Kim, H. Park, J. R. Morrison, and D. H. Shim, “Persistent UAV service: An improved scheduling formulation and prototypes of system components,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, vol. 74, no. 1-2, pp. 221–232, 2014.
- [39] F. P. Kemper, K. A. Suzuki, and J. R. Morrison, “UAV consumable replenishment: Design concepts for automated service stations,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, vol. 61, no. 1-4, pp. 369–397, 2011.

- [40] M. Wang, H. Qiu, and M. Wang, “Systems and methods for UAV battery power backup,” 2016.
- [41] K. A. Suzuki, P. Kemper Filho, and J. R. Morrison, “Automatic battery replacement system for UAVs: Analysis and design,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, vol. 65, no. 1-4, pp. 563–586, 2012.
- [42] Jack, “Quadcopter frame sizes - which class series quadcopter will you make?” 2017. [Online]. Available: <http://www.rcdronegood.com/quadcopter-frame-sizes-class/>
- [43] Amberroot, “Amberroot.” [Online]. Available: <http://www.amberroot.com/REhubMPPT.php>
- [44] P. A. Cassani and S. S. Williamson, “Design, testing, and validation of a simplified control scheme for a novel plug-in hybrid electric vehicle battery cell equalizer,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 3956–3962, 2010.

Apêndice A

Esquemas e PCBs do BMS

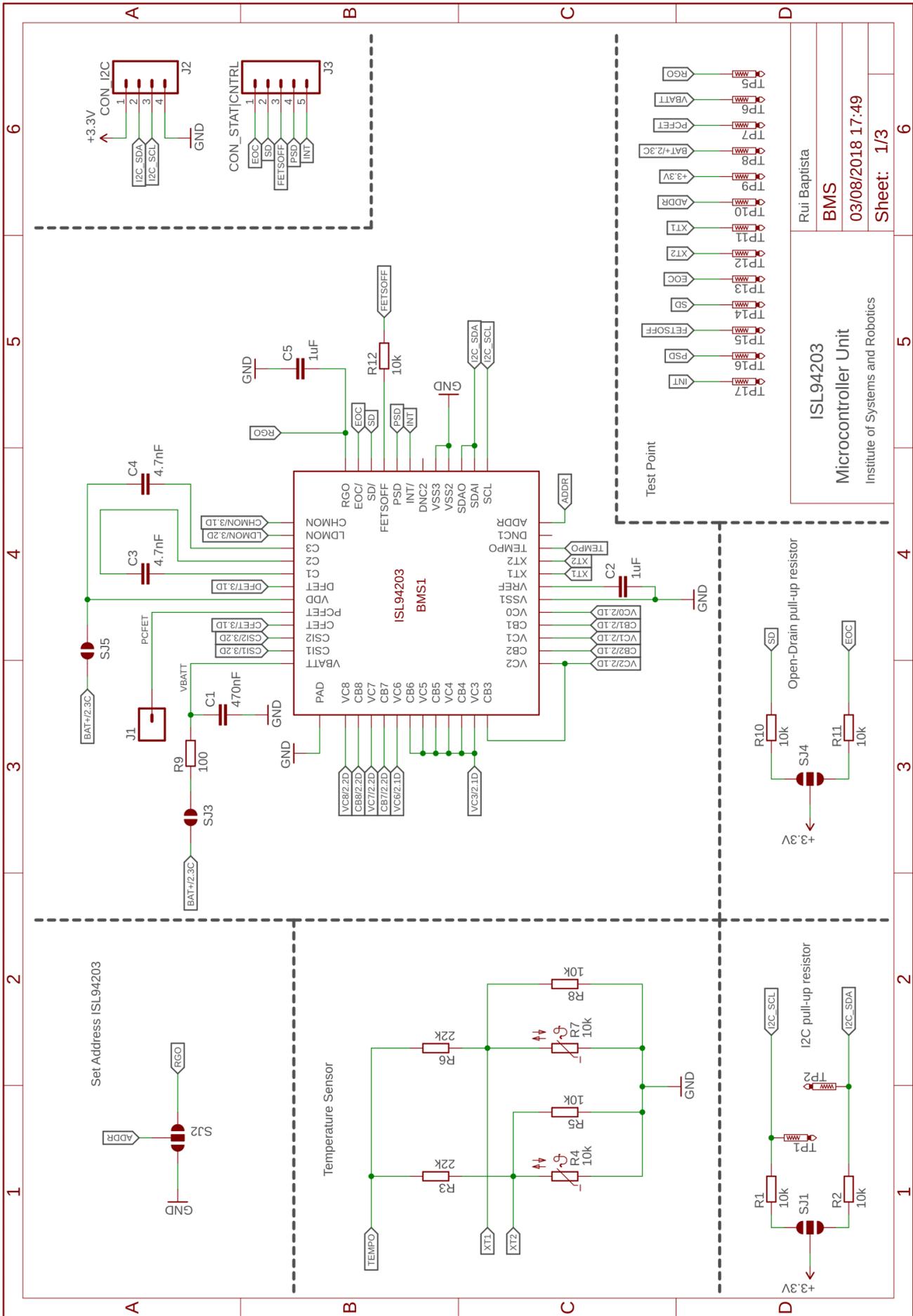


Figura A.1: Esquema do circuito integrado ISL94203.

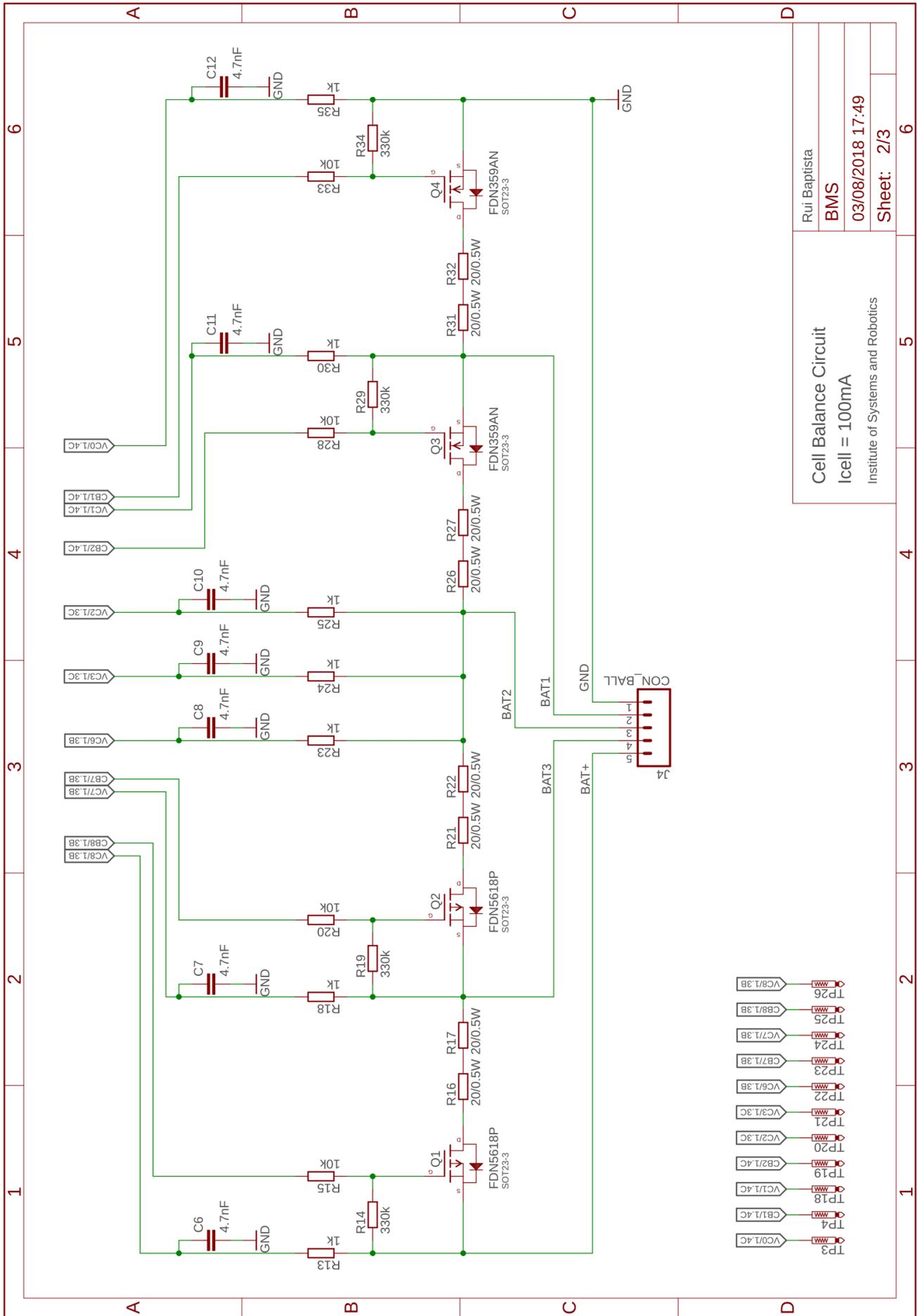


Figura A.2: Esquema do circuito de equilíbrio do BMS.

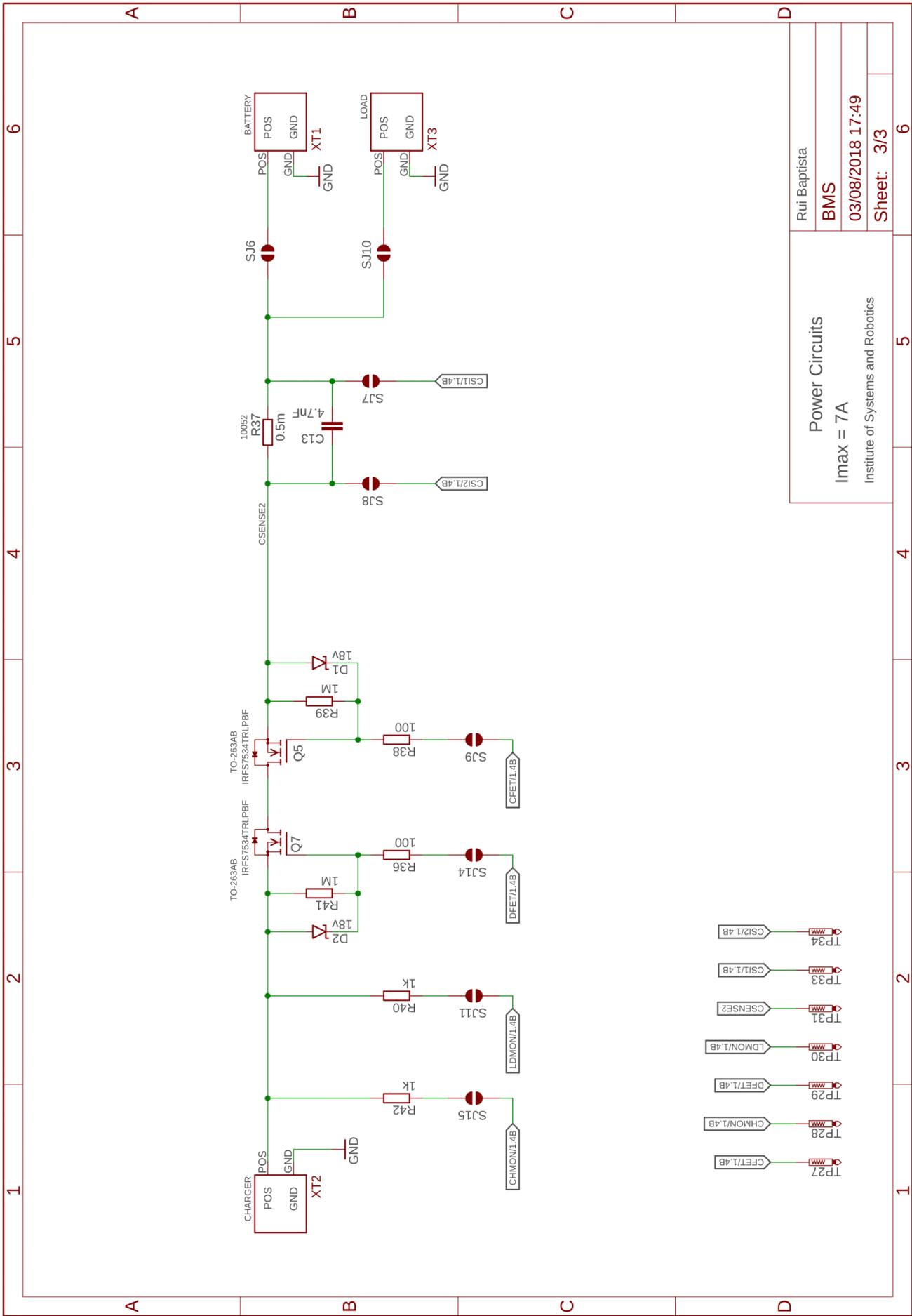
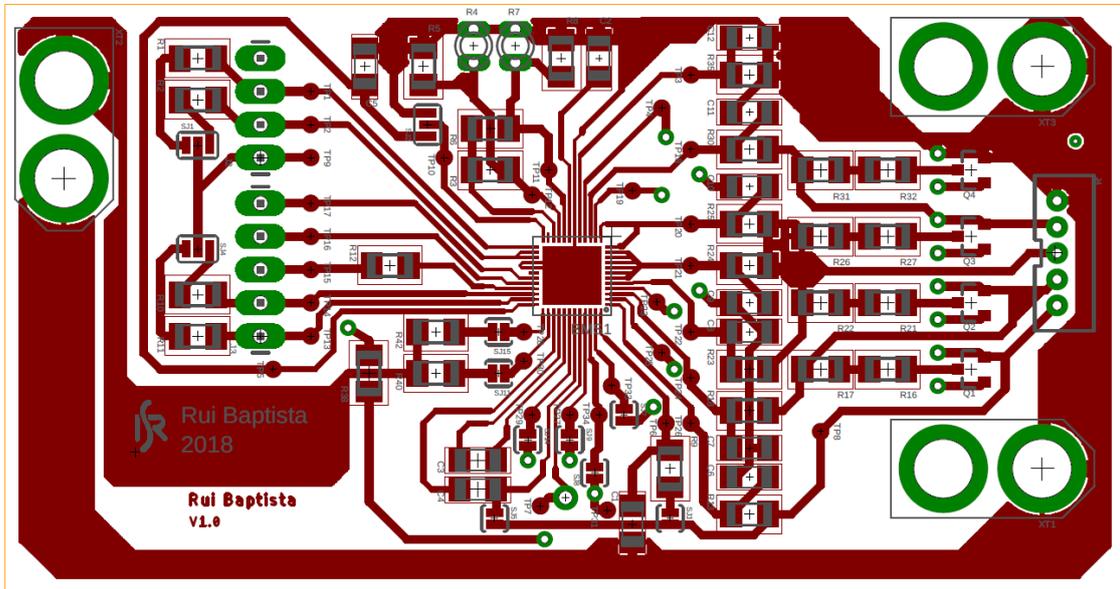
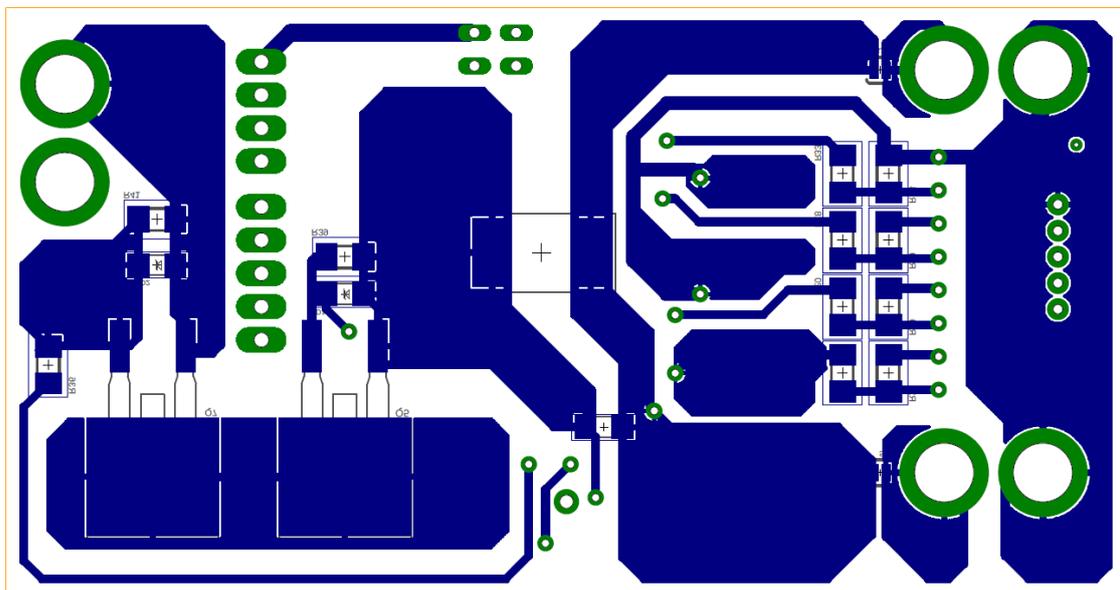


Figura A.3: Esquema do circuito de potência do BMS.



(a)



(b)

Figura A.4: (a) Desenho da PCB do BMS camada TOP. (b) Desenho da PCB do BMS camada BOTTOM.

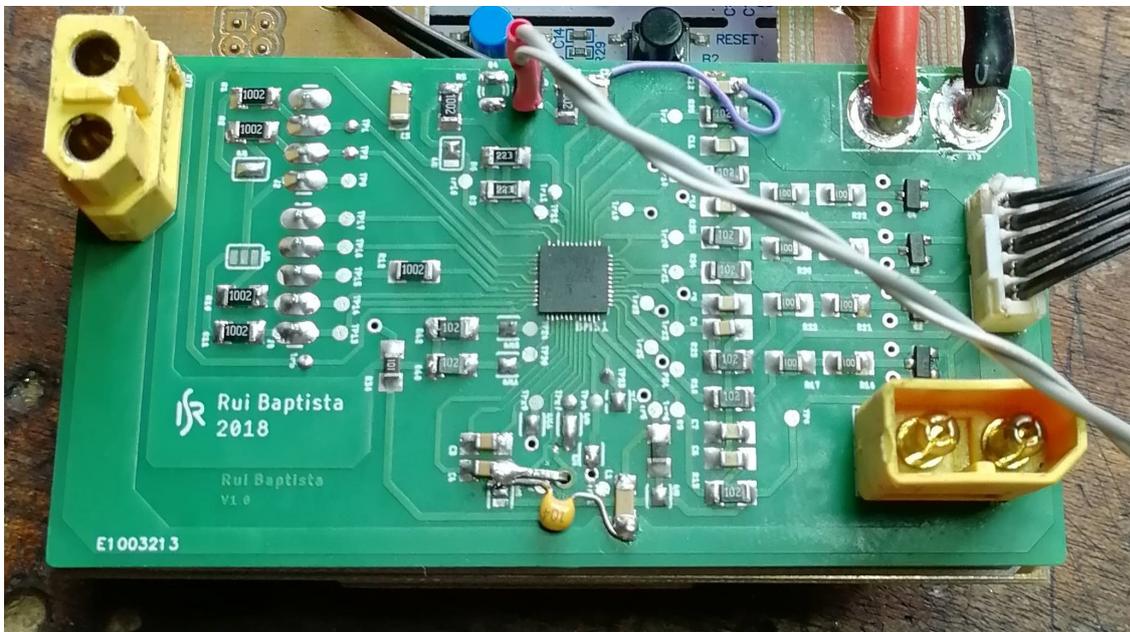


Figura A.5: PCB do BMS camada TOP

Apêndice B

Esquemas e PCBs do Módulo UAV

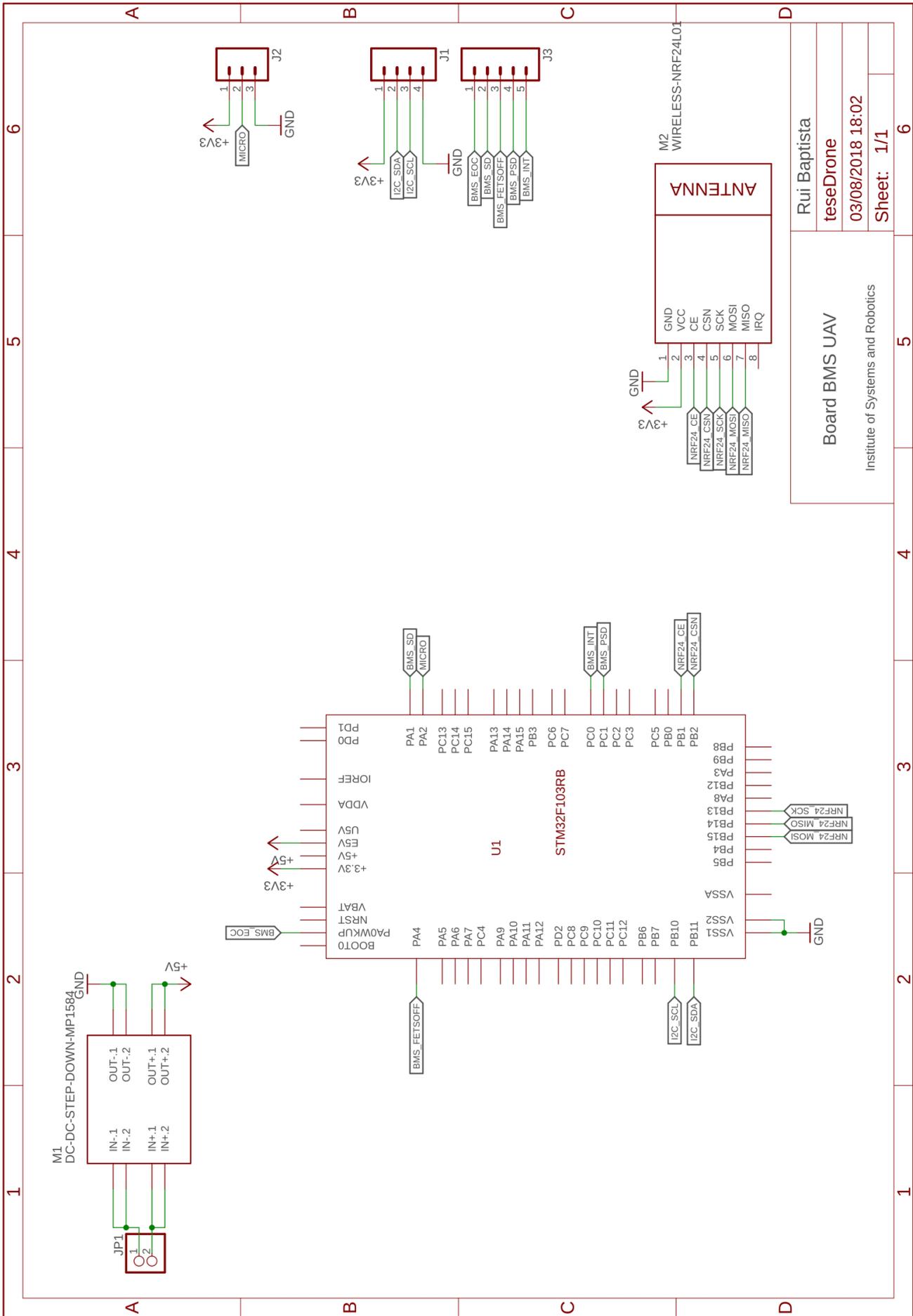
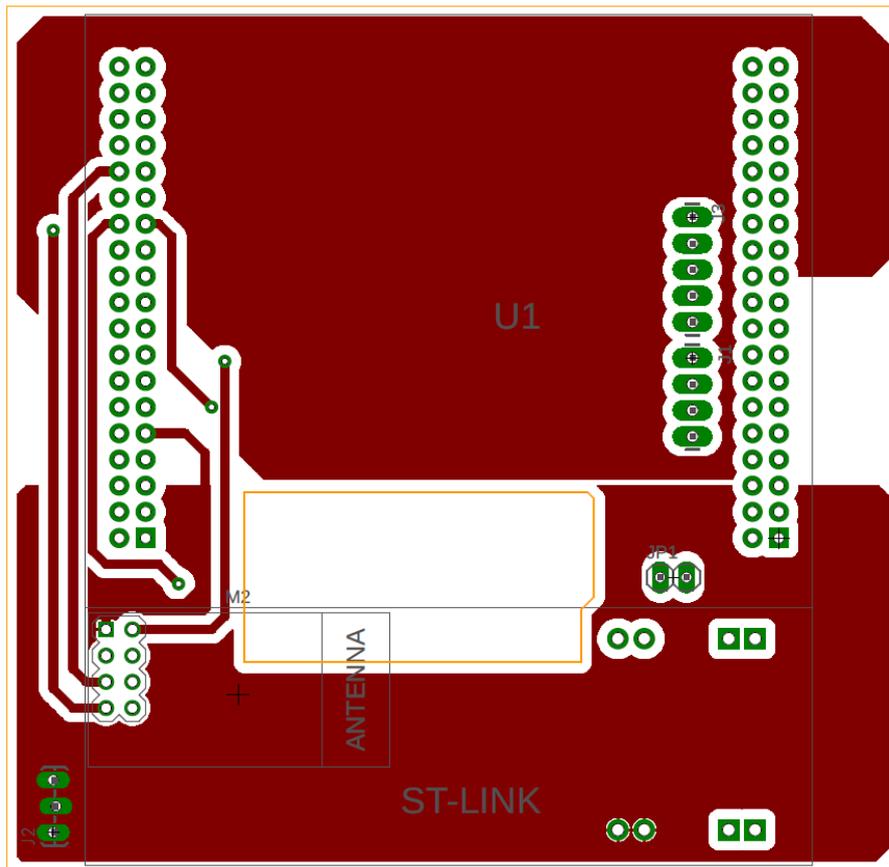
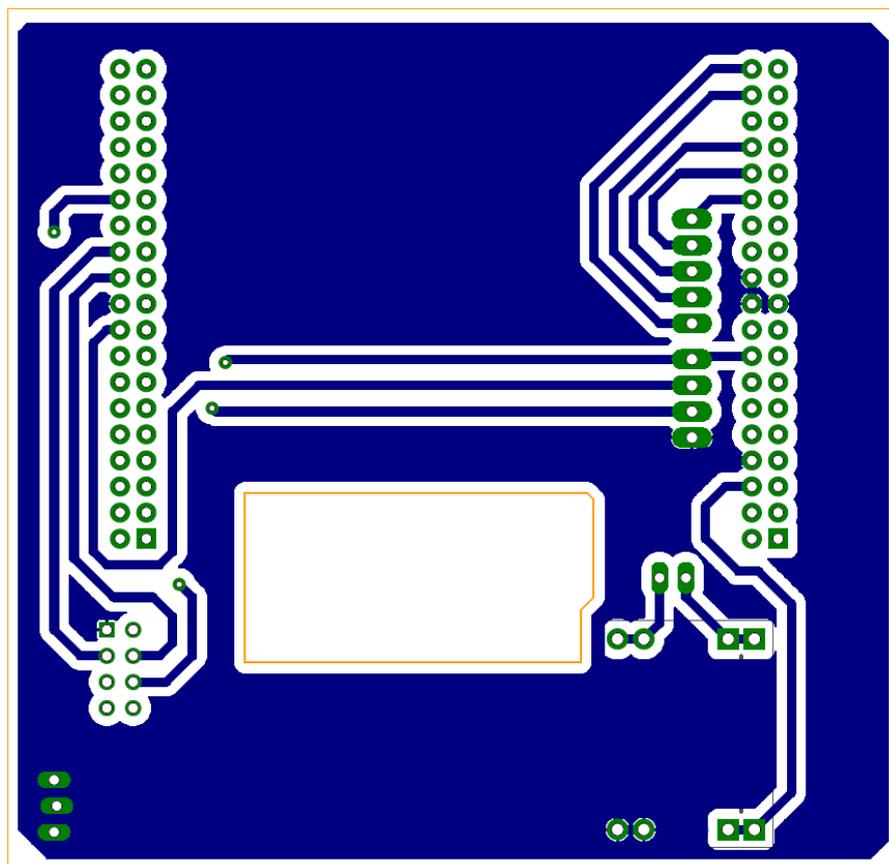


Figura B.1: Esquema do circuito de controlo do módulo UAV.

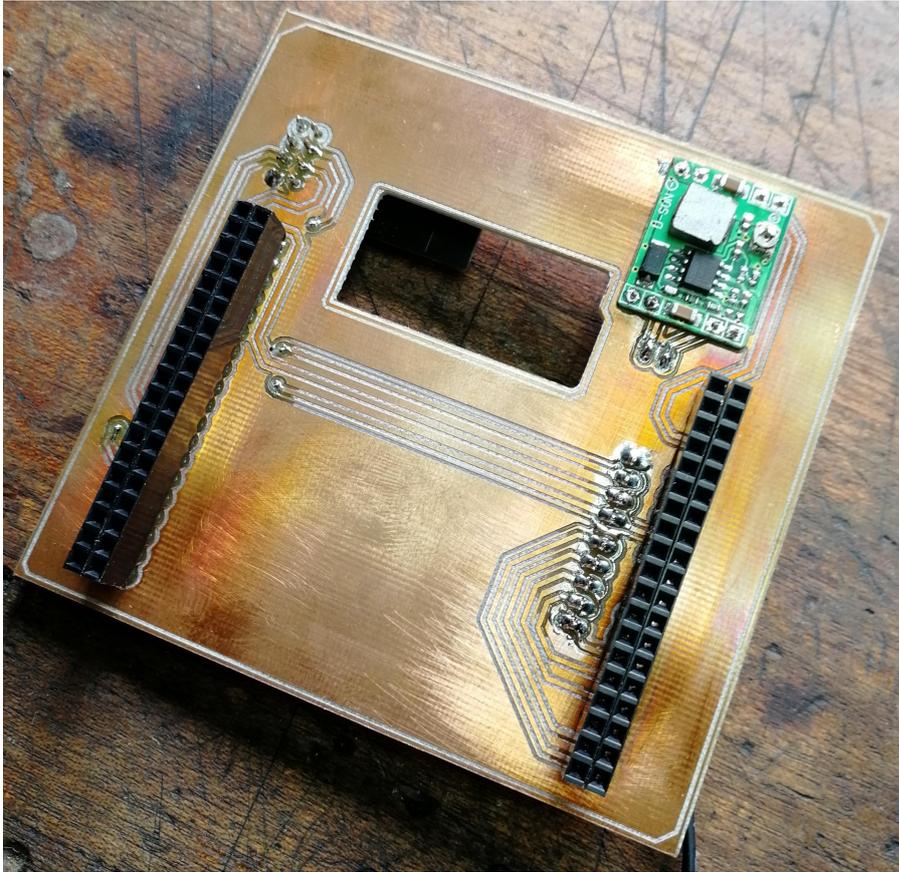


(a)

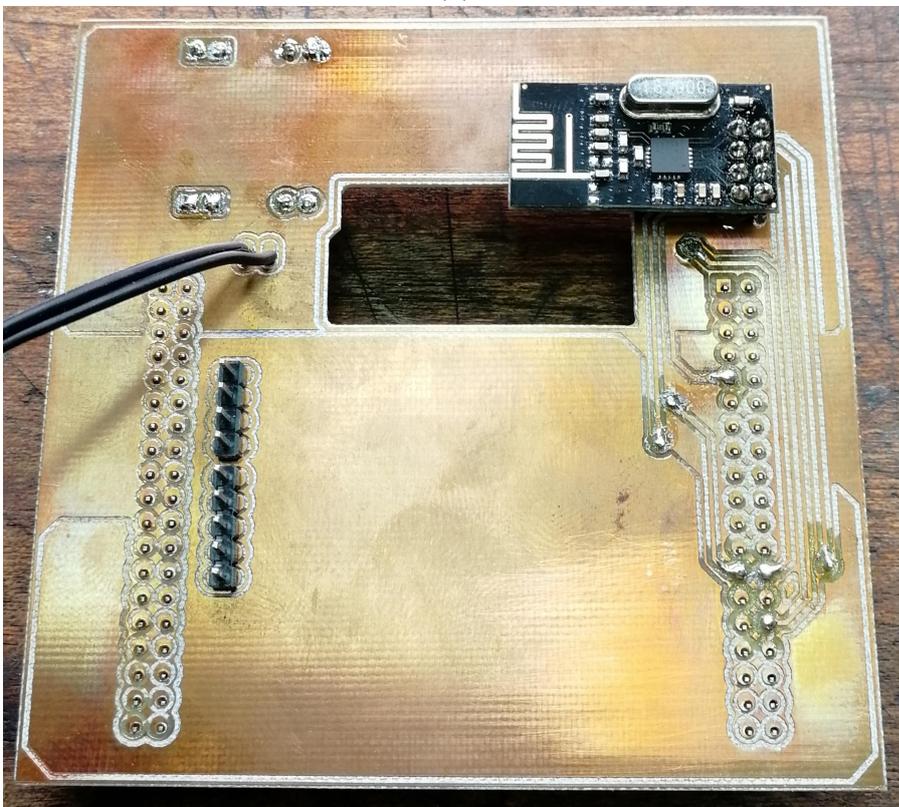


(b)

Figura B.2: (a) Desenho da PCB do Módulo UAV camada TOP. (b) Desenho da PCB do Módulo UAV camada BOTTOM.



(a)

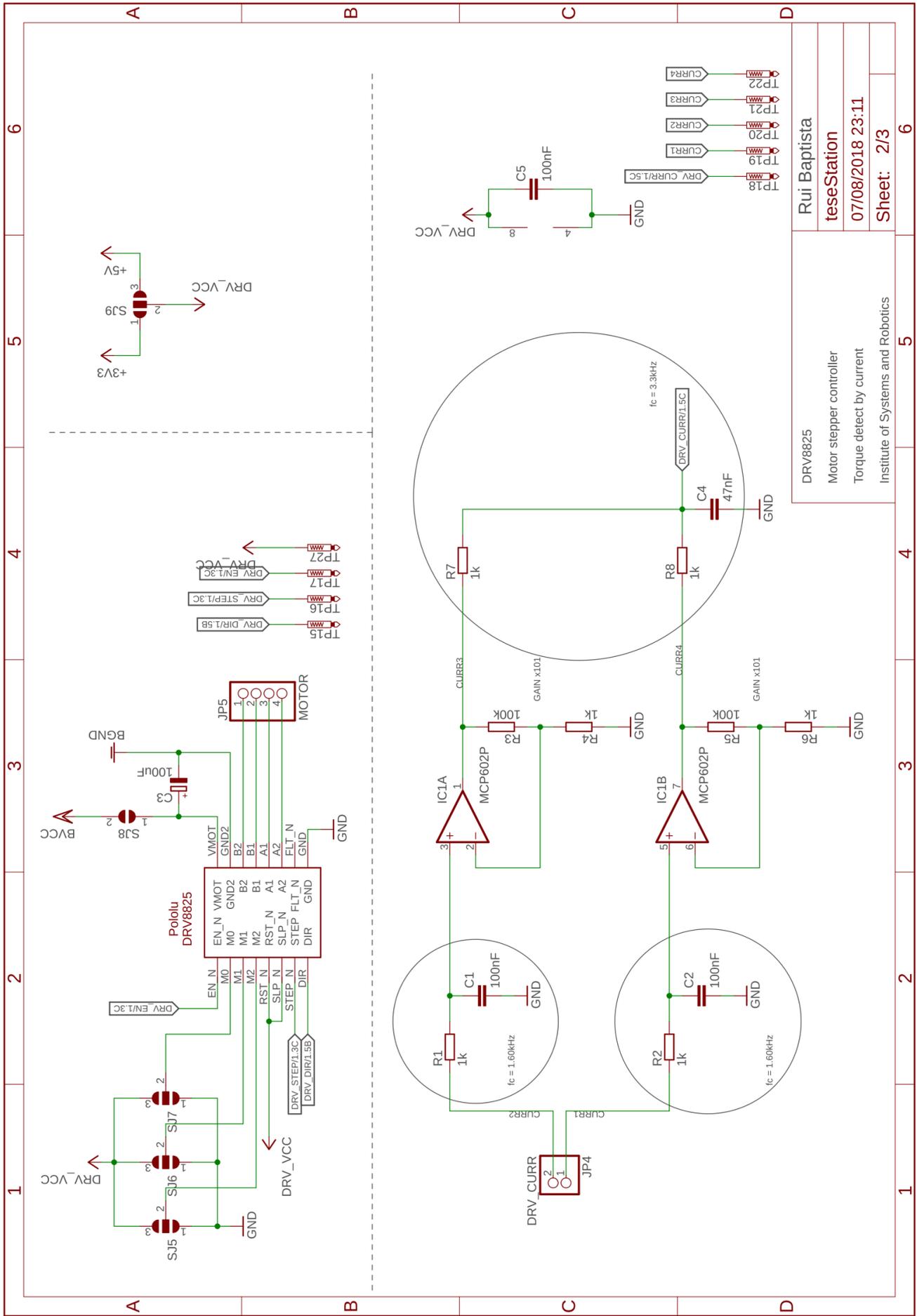


(b)

Figura B.3: (a) PCB do Módulo UAV camada TOP. (b) PCB do Módulo UAV camada BOTTOM.

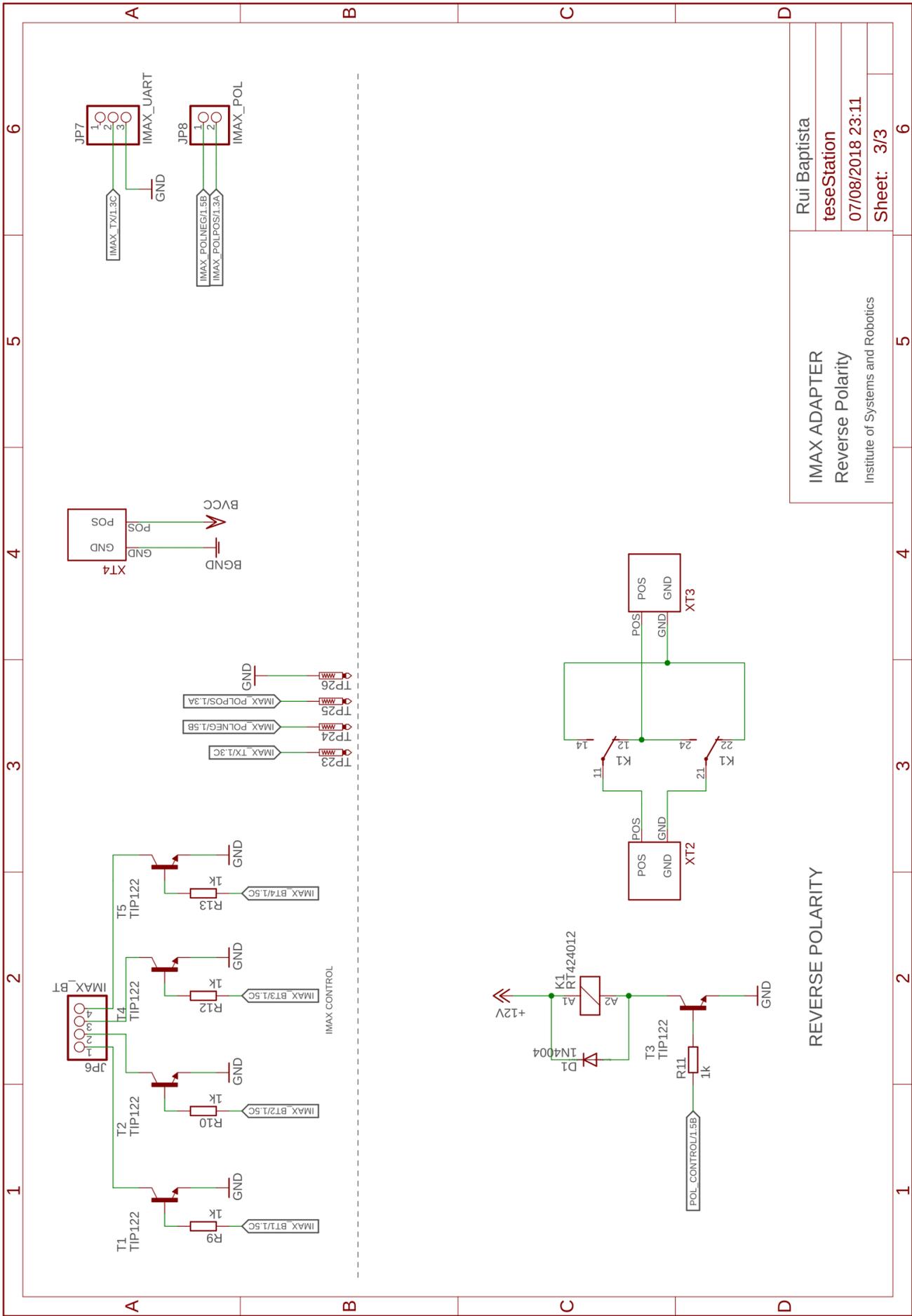
Apêndice C

Esquemas e PCBs do DroneStation



DRV8825	Rui Baptista
Motor stepper controller	teseStation
Torque detect by current	07/08/2018 23:11
Institute of Systems and Robotics	Sheet: 2/3

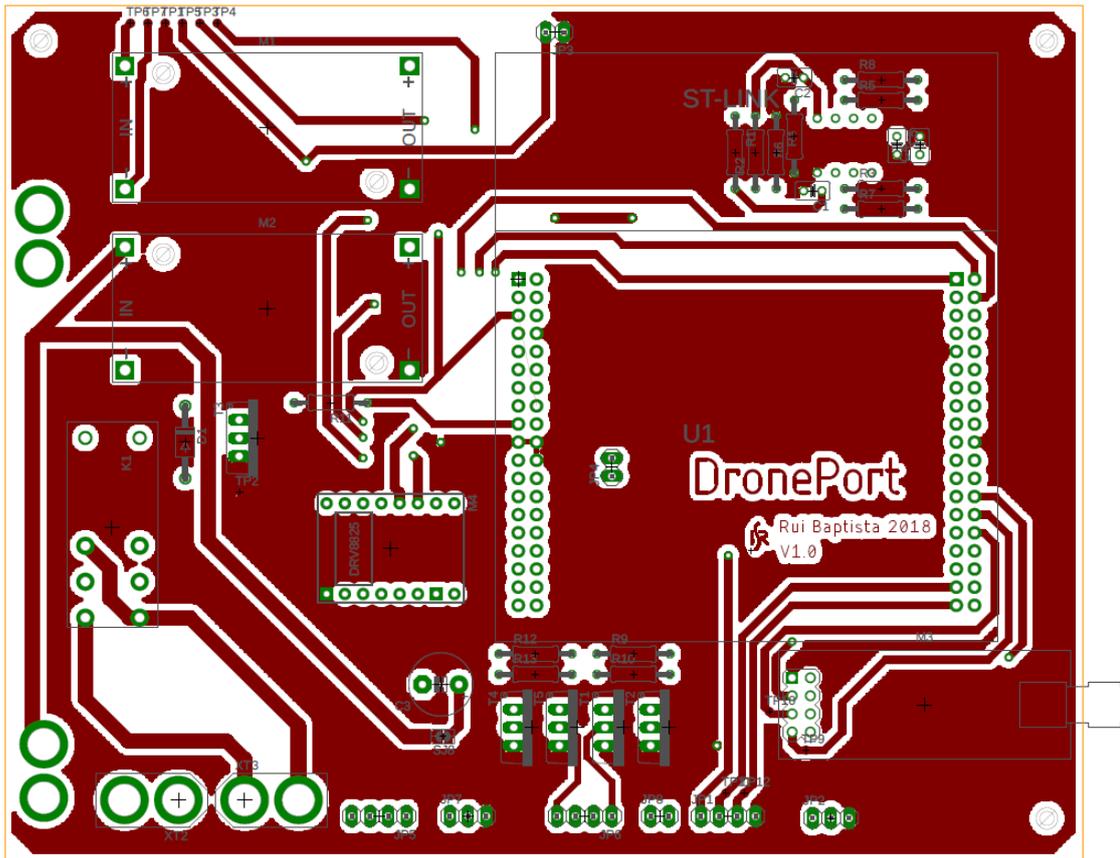
Figura C.2: Esquema do circuito de controlo do motor de passo e deteção de força.



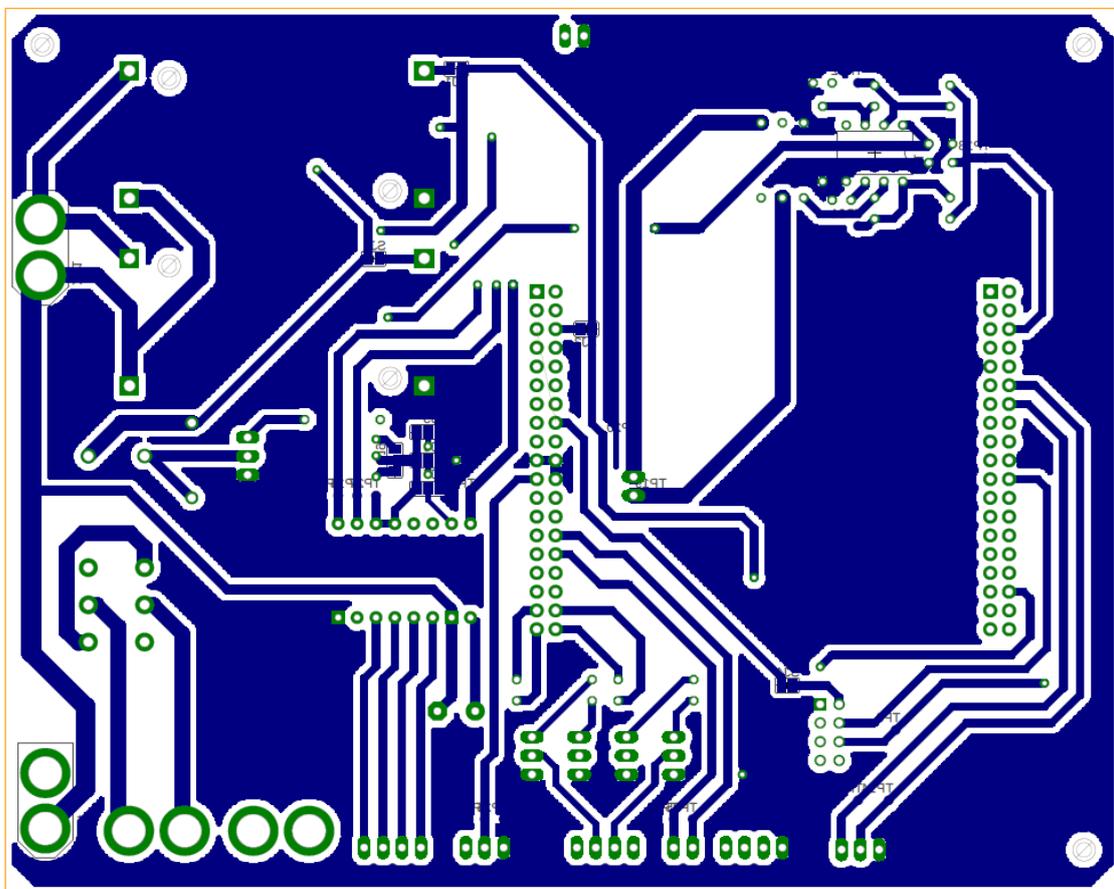
Rui Baptista	
teseStation	
07/08/2018 23:11	
Sheet: 3/3	6

IMAX ADAPTER
Reverse Polarity
Institute of Systems and Robotics

Figura C:3: Esquema do circuito de controlo do carregador IMAX e circuito de inversão de polaridade.

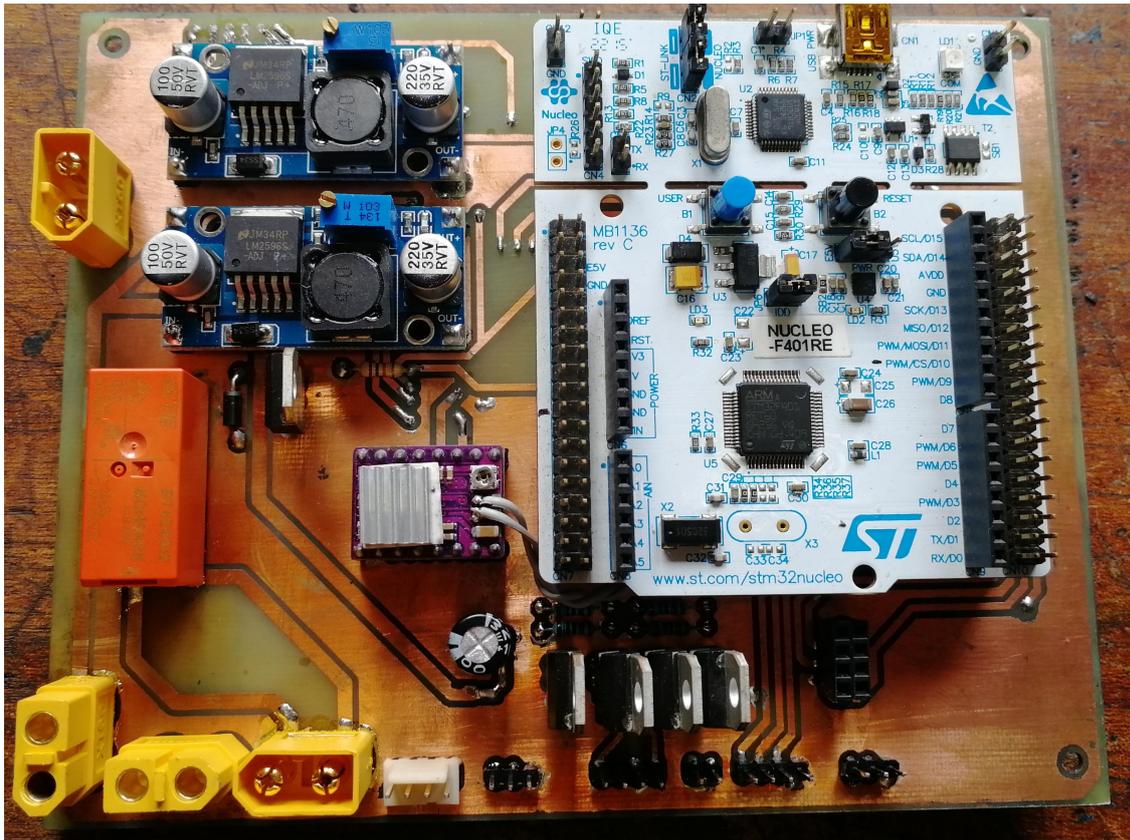


(a)

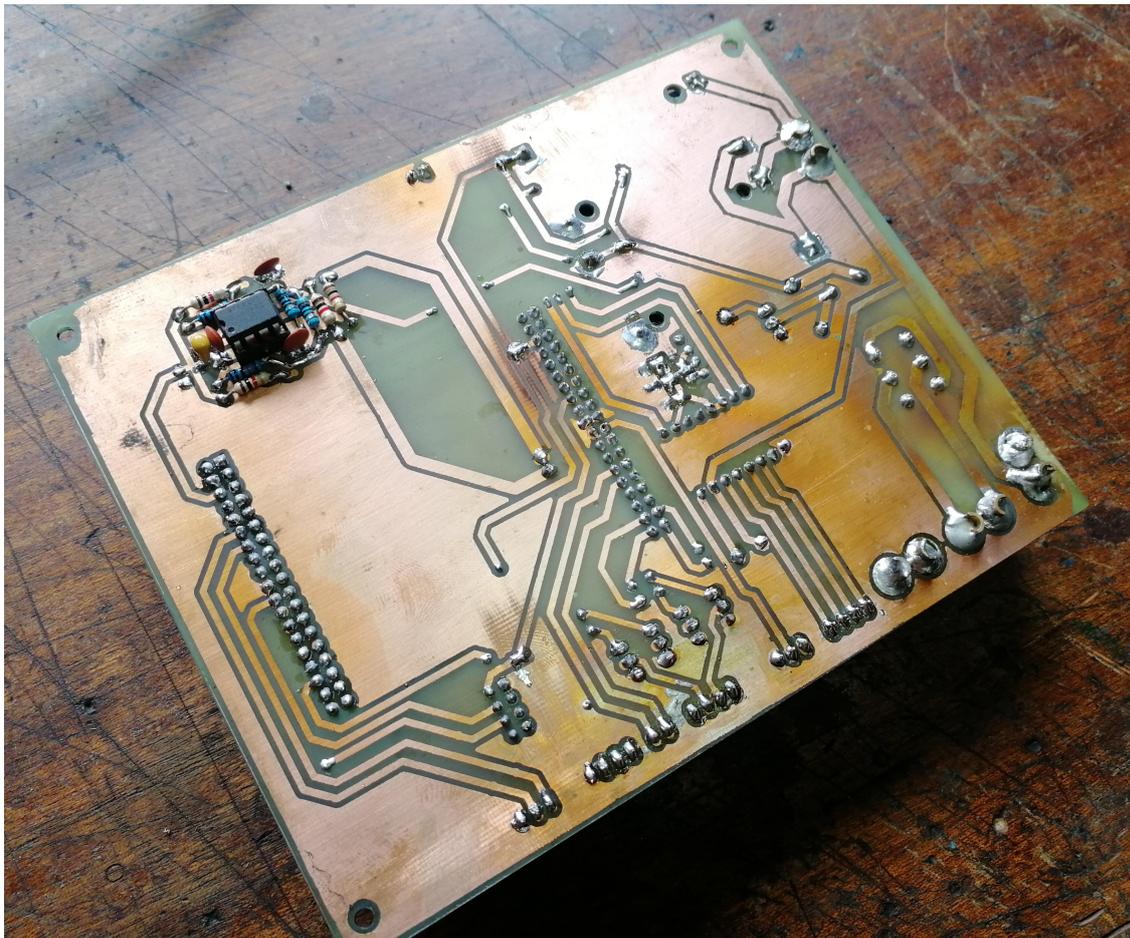


(b)

Figura C.4: (a) Desenho da PCB do DronePort camada TOP. (b) Desenho da PCB do DronePort camada BOTTOM.



(a)



(b)

Figura C.5: (a) PCB do DronePort camada TOP. (b) PCB do DronePort camada BOTTOM.

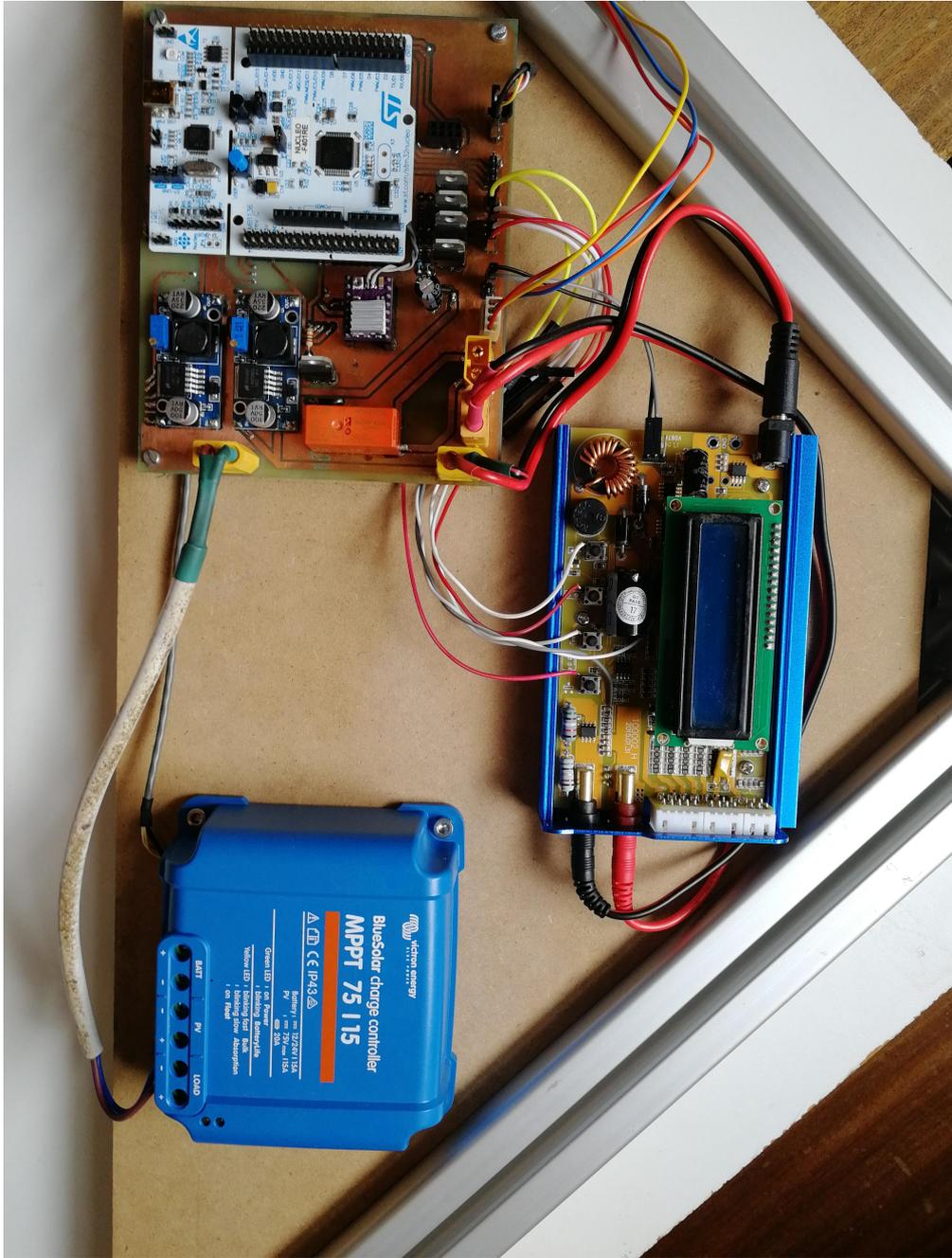


Figura C.6: Unidade de controlo do DronePort

Apêndice D

Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

Paineis Fotovoltaicos - Dimensionamento

<u>Potência Máxima do Sistema</u>			
Componentes	Tensão (V)	Corrente (A)	Potencia (W)
Base de Carregamento	25.2	7	176.4
DronePort em Vazio	12	0.2	2.4
Sistema de Alinhamento	12	2	24
	Sobredimensionamento		5%
	Potencia Total		213

<u>Avaliação de Recursos e Requisitos</u>		
Número de horas de sol por dia (H)	7.4	Em Coimbra
Radiação solar incidente no plano (MW/m ²)	700	Em Coimbra
Número de dias de autonomia (D)	3	
Tensão do sistema (V)	12	
Número de horas de funcionamento (H)	24	
Número de carregamento por dia (D)	5	
Tempo médio de Alinhamento (min)	5	
Tempo médio de carregamento (H)	1	
Rendimento do sistema (%)	83%	Rendimento Global
Profundidade maxima de descarga	60%	

Energia Consumida (Wh)	997
Potência de pico necessaria (Wp)	112
Capacidade mínima da bateria (Ah)	415

Figura D.1: Especificações e necessidades energéticas do DronePort.

Lista de Paineis								
Modelo	Dimensão (cm)	Tensão (V)	Potência de pico (Wp)	Tol (%)	Rendimento (%)	Icc (A)	Associação	Nº de módulos
GPAP6-50W	67x57	12	50	±3%	13.1	2.8	Paralelo	3
GPAP6-20W	35x49	12	20	±3%	11.7	1.1	Paralelo	6
Luxor LX-150P	148,2x67,6	12	150	0 / +5%	---	8.59	Paralelo	1
Luxor Lx-200M	80,8x158	24	200	0 / +5%	15.79	5.87	Paralelo	1
GPAP6-100W	100x50	12	100	±3%	11	5.39	Paralelo	2

Lista de Baterias						
Modelo	Tensão (V)	Tipo	Capacidade (Ah)	Nº Baterias	Bat Serie	Bat Paralelo
DAB12.33EV	12	AGM	33	13	1	13
DAB12.150EV	12	AGM	150	3	1	3
UCG104-12	12	GEL	104	4	1	4
Dyno Europe 72	12	A.A	75	6	1	6

Lista de Reguladores						
Modelo	Tensão (V)	Tipo	Corrente Maxima (A)	Icc FV Ref (A)	Corrente Minima (A)	Nº Reguladores
Victron 75/10	12 e 24	MPPT	10	2.8	3.5	1
BlueSolar Light 05	12 e 24	PWM	5	2.8	3.5	1

Figura D.2: Várias soluções dos módulos constituintes do sistema fotovoltaico.

Apêndice E

Software de Monitorização

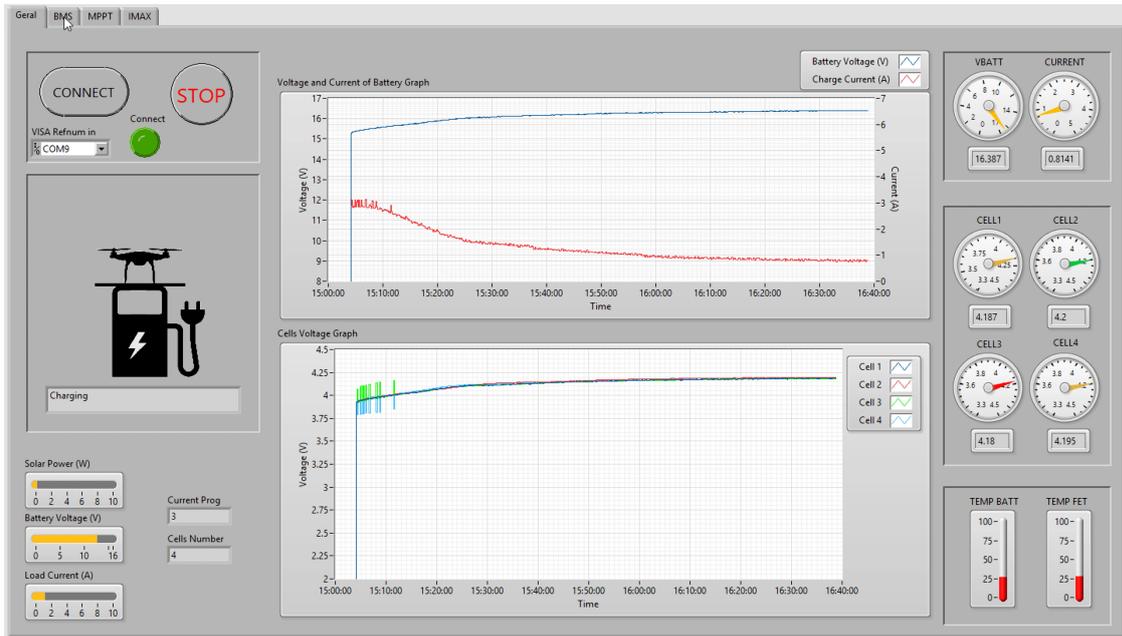


Figura E.1: Visão geral do software módulo Geral

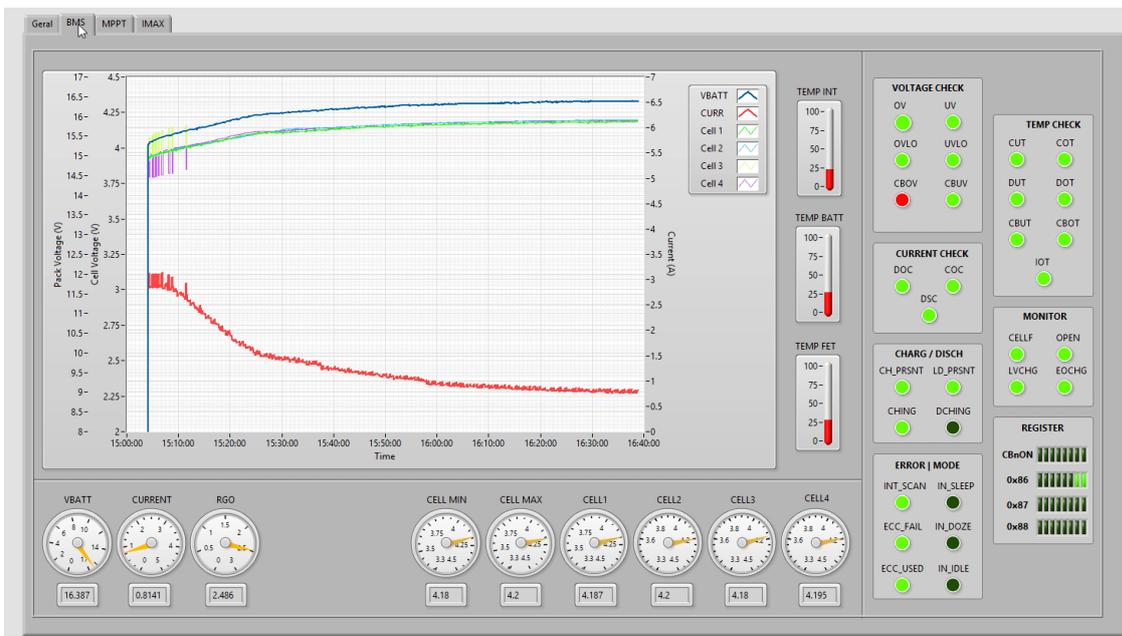


Figura E.2: Visão geral do software módulo BMS

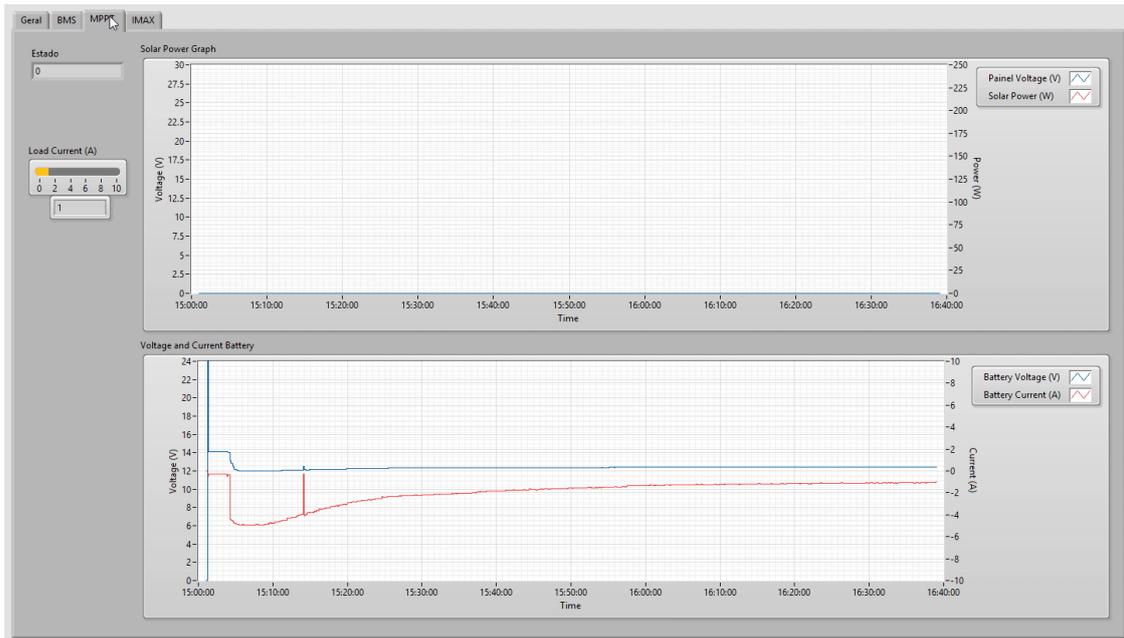


Figura E.3: Visão geral do software módulo MPPT

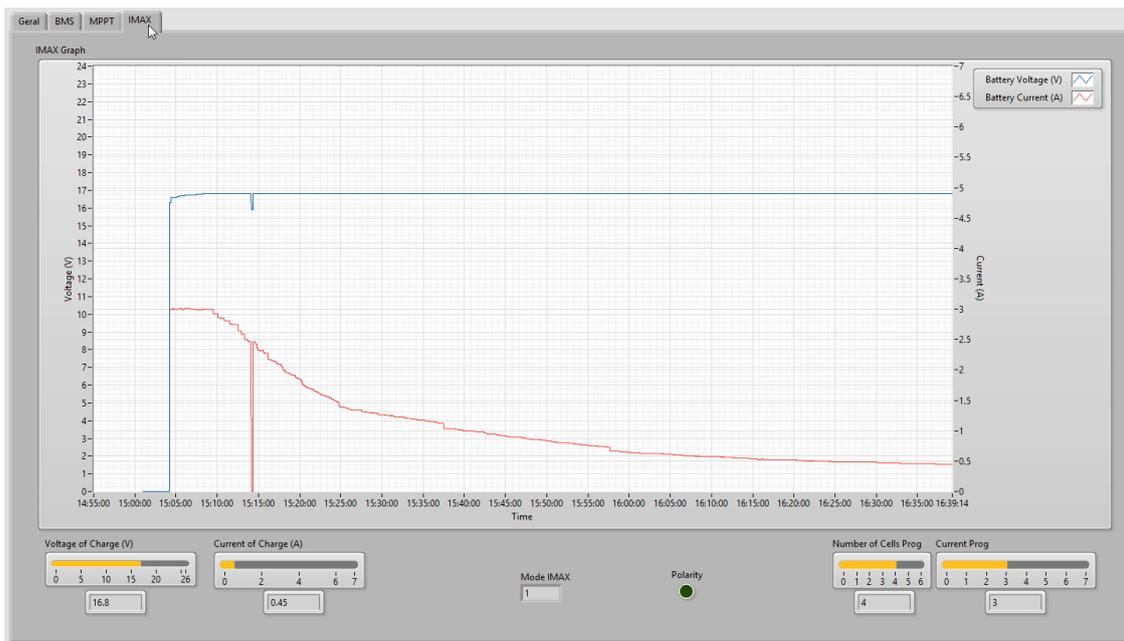


Figura E.4: Visão geral do software módulo iMAX

Apêndice F

Desenhos CAD do Protótipo

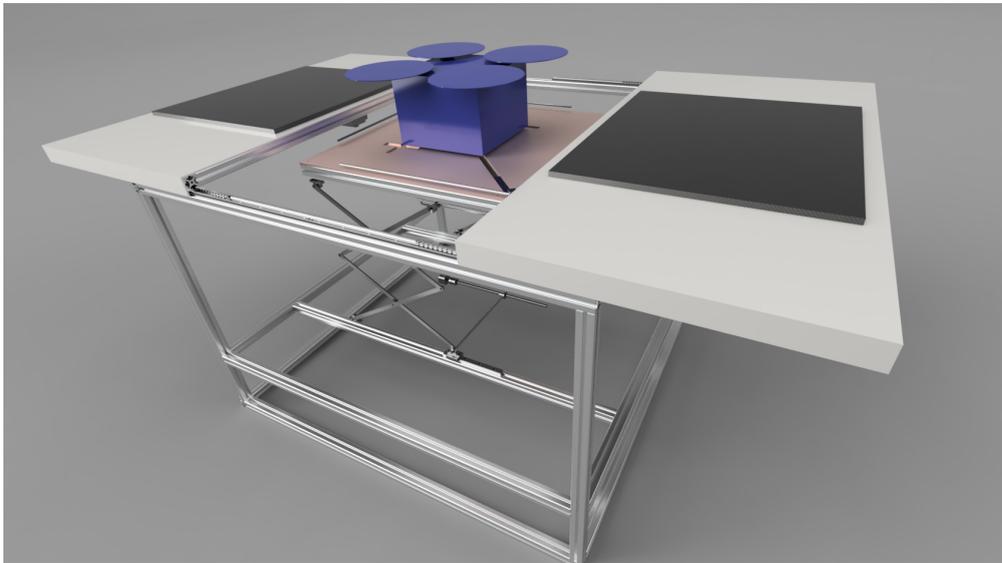


Figura F.1: Protótipo do DronePort Aberto.



Figura F.2: Protótipo do DronePort Fechado.

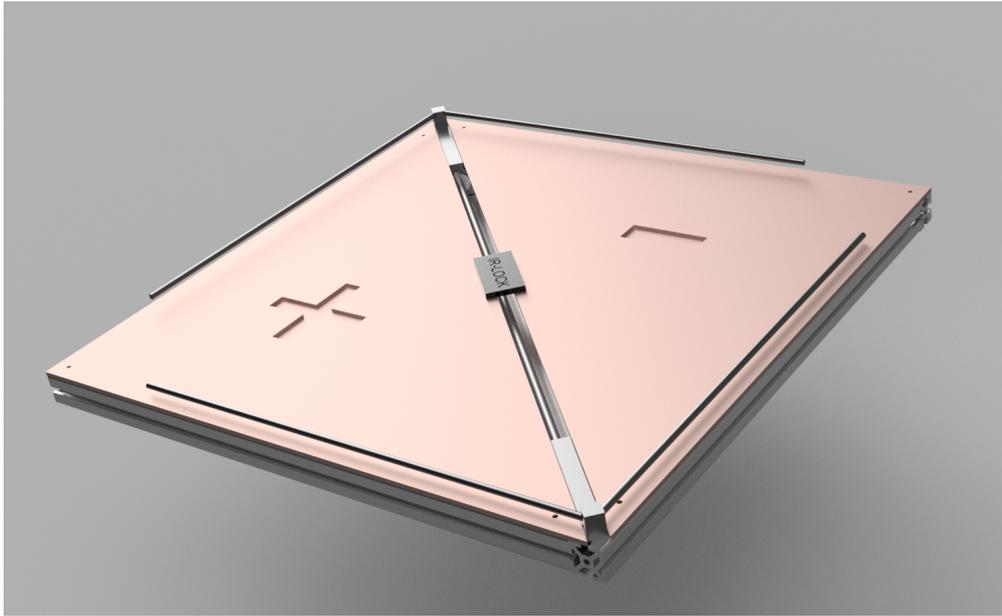


Figura F.3: Protótipo plataforma desenvolvida.

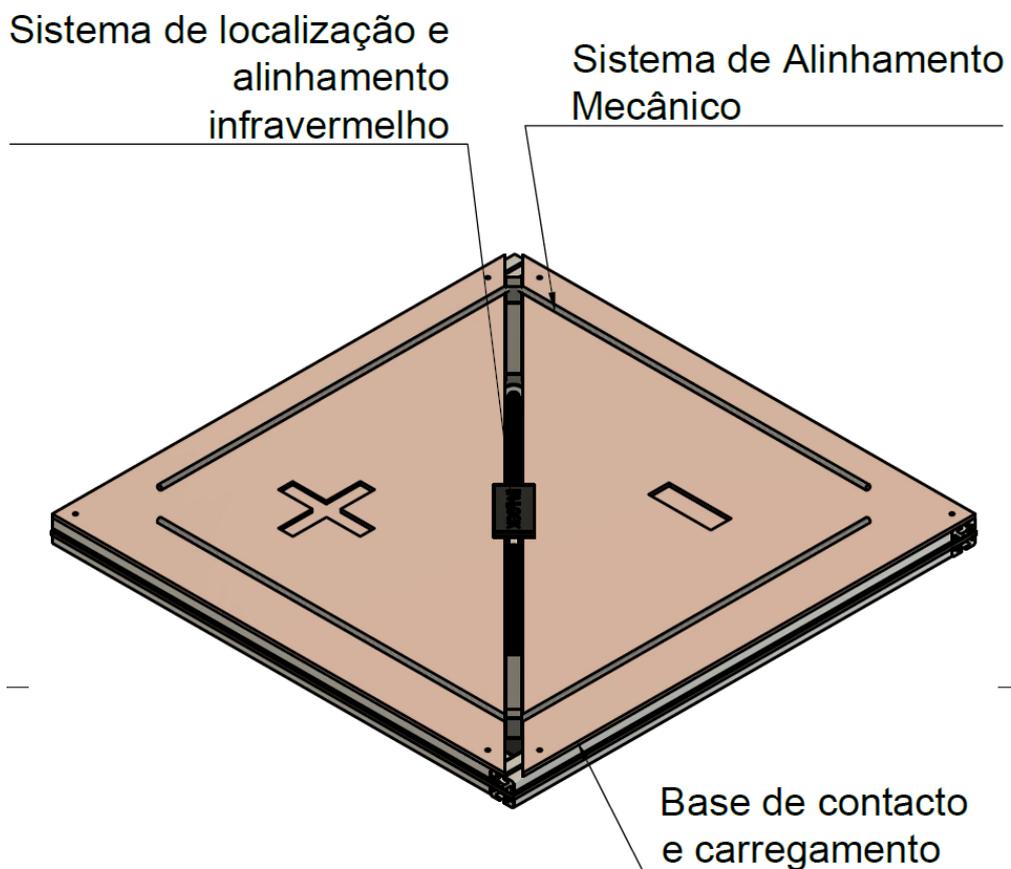


Figura F.4: Legenda do protótipo plataforma desenvolvida.

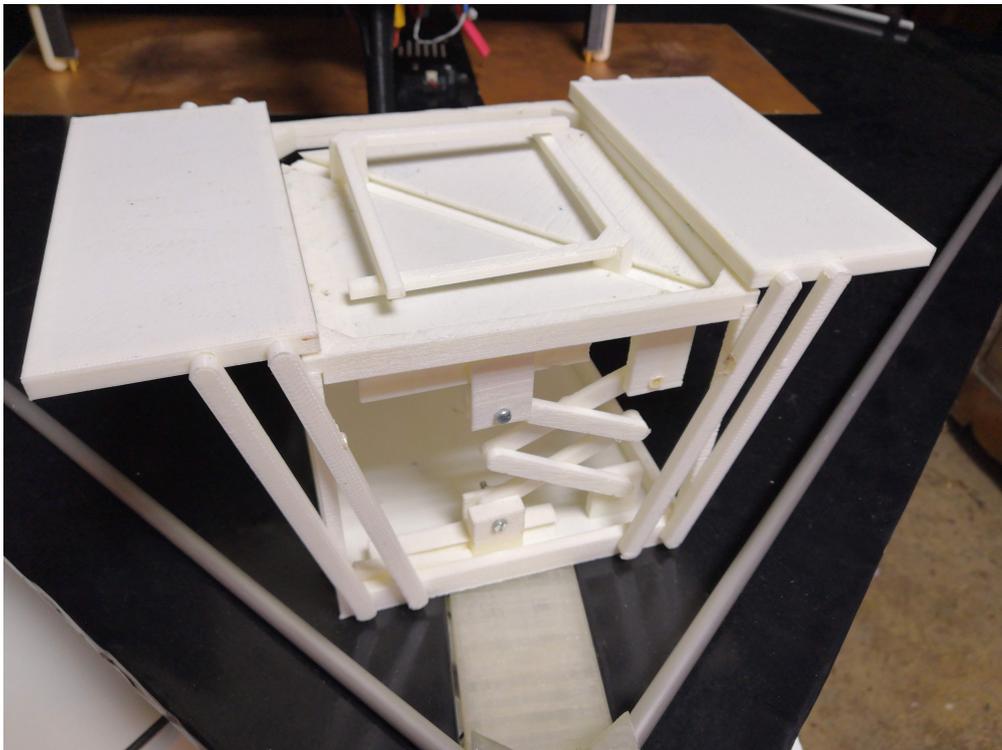


Figura F.5: Protótipo à escala 1:8 impresso em PLA.