

LABORATÓRIO DE SISTEMAS AUTÓNOMOS



Relatório de Projecto

Collision Sensor Array para Drones recorrendo a Sensores ToF e *Solid State LiDAR*

André Moreira Oliveira
Tiago Francisco Pereira Cunha

Mestrado de Sistemas Autónomos
LaSET - Laboratório de Sistemas Embebidos e Tecnologias

9 de dezembro de 2021

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Motivação	3
1.2	Cenários de aplicação	3
1.3	Objectivos	3
1.4	Estrutura do Relatório	4
2	Estado da Arte	7
2.1	<i>Stereo-Vision</i>	8
2.2	<i>Ultrasonic</i> (Sonar)	8
2.3	<i>Infrared</i>	9
2.4	<i>Monocular Vision</i>	9
2.5	LiDAR	10
2.5.1	<i>Mechanical</i> LiDAR	10
2.5.2	<i>Solid State</i> LiDAR	12
3	Análise de Requisitos	17
3.1	Cobertura de 360 graus	17
3.2	Massa inferior a 100g	18
3.3	Tensão operacional de 5 a 12 V	19
3.4	Alcance dos sensores de 10 metros	19
3.5	Aquisição de dados a diferentes velocidades (1,5 a 3 m/s)	20
3.6	Adaptabilidade posicionamento face à geometria do robô	20

3.7 Barramento de comunicação (UART, CAN, RS-232 e RS-485)	21
4 Arquitectura de Alto Nível	23
4.1 Arquitectura Centralizada	23
4.2 Arquitectura Distribuída	25
5 Projecto	27
5.1 Arquitectura do Sistema	27
5.1.1 Análise ao Sistema Previamente Desenvolvido	27
5.1.2 Proposta de Projeto	30
5.2 Opções de Projeto	32
5.2.1 Sensores LiDAR	33
5.2.2 Microcontroladores STM32	39
5.3 Descrição de <i>Hardware</i>	41
5.3.1 Esquema Elétrico	42
5.3.2 Placa de Circuito Impresso	54
5.4 Descrição de <i>Análise Financeira</i>	57
5.5 Descrição do <i>Software</i>	60
A Esquema Eléctrico do Sistema	69
B Placa de Circuito Impresso Desenvolvida	73

Lista de Figuras

1.1	Espetro Eletromagnético [1].	2
2.1	Velodyne VLP-16 laser stack [2].	11
2.2	16 <i>line</i> LiDAR - <i>Velodyne VLP-16</i> [3].	12
2.3	Optical Phased Array [4].	13
2.4	TeraRanger Tower Evo - <i>solid-state</i> LiDAR [5].	14
3.1	<i>Mechanical</i> LiDAR <i>vs solid state</i> LiDAR [6].	18
4.1	Arquicetura de alto nível centralizada.	24
4.2	Arquicetura de alto nível distribuída.	26
5.1	Arquicetura sistema previamente desenvolvido	28
5.2	Arquicetura do sistema	31
5.3	Arquicetura do módulo <i>slave</i>	32
5.4	HPS-3D160Pro.	35
5.5	Solid State lidar HPS-3D160 Pro [7]	37
5.6	Solid State lidar Leddar Vu8 [7]	38
5.7	STM32F103RBT6	43
5.8	Interfaces de comunicação <i>I²C</i>	44
5.9	Esquema de ligação do <i>transceiver</i> CAN	45
5.10	Esquema de ligação do <i>transceiver</i> RS-485	47
5.11	Esquema do circuito de alimentação	51

5.12	Esquema do circuito de alimentação	56
5.13	Fluxograma do módulo em modo Slave	60
5.14	Fluxograma do módulo em modo Master	61
A.1	Esquema das ligações ao MCU STM32F103RBT6.	70
A.2	Esquema de filtragem e conversão da tensão de entrada para as alimentações do circuito.	71
A.3	Esquema dos circuitos que implementam as interfaces de co- municação RS-485, I2C, USART e CAN.	72
B.1	PCB desenvolvida vista de uma camada superior.	73

Lista de Tabelas

5.1	Características dos sensores da ST	34
5.2	Características dos sensores da Benewake	36
5.3	Características do sensor HPS-3D160 Pro	37
5.4	Características do sensor VU08-75H0005	38
5.5	Calibração do SONAR	41
5.6	Consumo de Corrente dos Componentes alimentados a 3,3 V	48
5.7	Consumo de Corrente dos Componentes alimentados a 5 V .	48
5.8	<i>Linear regulator vs Switching Regulator</i>	49
5.9	Possível orçamento dos componentes que constituem a PCB .	58
5.10	Possível orçamento da solução desenvolvida	59

Lista de Acrónimos

I^2C	Inter-Integrated Circuit
APM	Pixhawk ArduPilot Mega
CAN	Controller Area Network
CANH	CAN High
CANL	CAN Low
CI	Circuito Integrado
CISC	Complex Instruction Set Computer
EMC	Electromagnetic compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
ESL	Equivalent Serie Inductance
ESR	Equivalent Series Resistor
FPU	Floating Point Units
FoV	Field of view
GCC	GNU Compiler Collection
GPIO	General Purpose Input Output
HAL	Hardware Abstraction Layer
INESC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores
ISA	Instruction Set Architecture

JTAG	Joint Test Action Group
JTAG-DP	Joint Test Action Group - Debug Port
LAN	Local Area Network
LED	Light-emitting diode
LL	Low-Layer
LSA	Laboratório de Sistemas Autónomos
LiDAR	Light Detection And Ranging
NVI	Nested Vectored Interrupts
OPA	Optical Phased Array
OSI	Open Systems Interconnection
PCB	Placa de Circuito Impresso
RTOS	Real-Time Operating Systems
SNR	Signal to Noise Ratio
ST	STMicroelectronics
SW-DP	Serial Wire - Debug Port
SWD	Serial Wire Debug
TEC	Tecnologia e Ciência
TOF	Time of Flight
TVS	Transient Voltage Suppressor
UAV	Unmanned Aircraft Vehicles

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 1

Introdução

O crescente desenvolvimento e procura pela automatização de um *Unmanned Aircraft Vehicles* (UAVs) deve-se à sua aplicabilidade nos vários cenários. Inicialmente desenvolvidos para propósitos militares e adotados em missões de busca e salvamento, vigilância e mapeamento [8]. O sucesso desta tecnologia no meio civil não está demarcado apenas pelo seu registo fotográfico, mas também pela sua aplicação em cenários como a agricultura, monitorização do ambiente, inspeção de infraestruturas e mais recentemente na indústria 4.0 em operações de logística e de controlo de stocks [9].

Melhorar um sistema autónomo não é tarefa fácil, pelo que a distribuição em módulos desse encargo com vista na aplicação num robô isolado é, certamente, uma boa aposta. Com isto, este projeto procura conceber um sistema auxiliar à navegação dos UAVs através de *collision sensor array Time of Flight* (ToF), nomeadamente *Solid State Detection and Ranging* (LiDAR). A sua utilização permitirá aprimorar a percepção robótica em ambiente desconhecido e potencialmente não controlado, conseguindo um aumento da segurança durante o voo de UAVs por meio da deteção de obstáculos.

Será necessário averiguar os sensores disponíveis no mercado assim como as tecnologias até então desenvolvidas capazes de atender os requisitos estipulados e equipar no UAV para deteção e prevenção de colisões.

Por um lado, ToF está associado ao processo de medição do tempo que um objeto, partícula ou onda leva a percorrer uma distância. Por sua vez, a tecnologia LiDAR utiliza um feixe de luz para medir a profundidade de um ambiente, podendo, estabelecer uma nuvem de pontos representativa do mesmo. O impulso gerado possui um comprimento de onda compreendido entre os $10 \mu m$ e os $250 nm$, correspondendo ao intervalo de luz infravermelha e a ultravioleta. Esta pode ser visível ao olho humano, conforme apresentado na Figura 1.1.

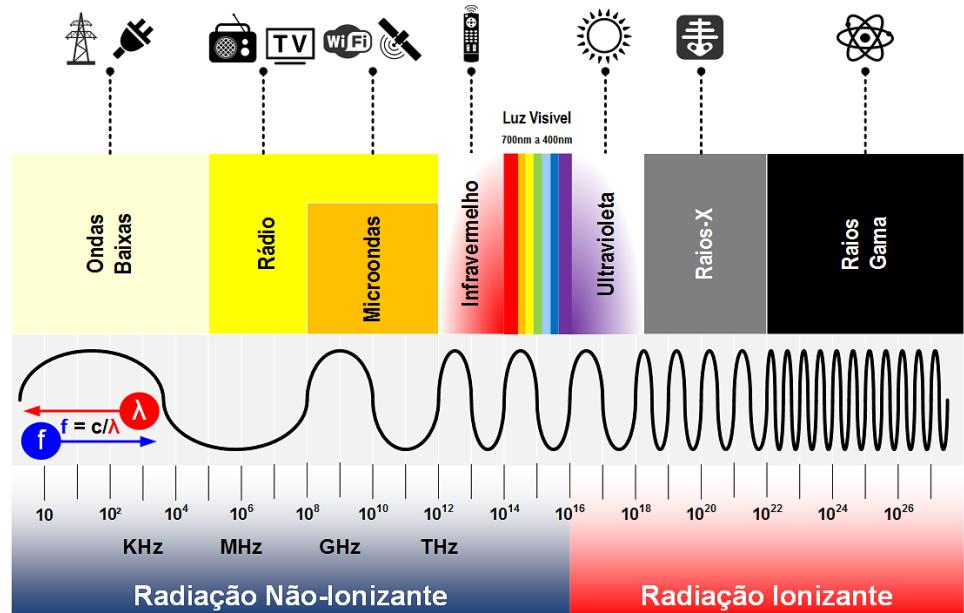


Figura 1.1: Espetro Eletromagnético [1].

Os sistema anti-collision em tempo real *ToF sensor arrays* desta-se, em certas aplicações, às tecnologias de mapeamento 3D do ambiente em redor do UAV. O seu baixo custo, fiabilidade e facilidade de integração em veículos aéreos promovem maior flexibilidade e aplicabilidade em ângulos que seriam inoperáveis para outros sensores.

Assim, este conjunto de sensores fornecem um sistema anti-collision 2D complementar recorrendo a feixes de luz modulados. A fase da luz refletida é

comparada com a fase inicialmente emitida. Esta diferença de fases permite deduzir a distância real do sensor ToF (e portanto, do drone) ao obstáculo [6].

1.1 Enquadramento e Motivação

O Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA) e o Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC) tem estado envolvidos em vários projectos enquadrados nas diversas áreas da robótica, nomeadamente robótica aérea, móvel terrestre e marítima. As várias pesquisas asseguram uma monitoria oceanográfico e ambiental, assim como segurança e transporte através de sistemas embarcados em tempo real, abrangendo processos precessão sensorial avançada [10].

1.2 Cenários de aplicação

Qualquer veículo autónomo, seja ele um robô aéreo, terrestre ou aquático, para detectar um obstáculo e realizar manobras evasivas, tais como a alteração da rota ou parar, necessita do auxílio de um subsistema complexo capaz de fornecer dados ao sistema principal de navegação. Isto posto, um módulo de detecção de obstáculos é crucial na automatização de um veículo [11]. Portanto, a principal aplicação deste projecto busca a incorporação do sistema concebido num drone para que este, através dos dados providenciados em tempo real, consiga navegar de maneira autónoma.

1.3 Objectivos

A conceção de um subsistema apto a apoiar a navegação autónoma de um UAV exige o estudo e compreensão da tecnologia anteriormente aplicada a drones para a detecção de obstáculos. A sua aplicação não deve causar mai-

ores perturbações para o voo síncrono do veículo, pelo que a incorporação deste modelo deve respeitar a distribuição de massa do sistema final, mantendo o centro de gravidade inicial.

Assim, após um melhor entendimento das ciências associadas propomos uma solução baseada em TOF e solid state LiDAR. Além do bom funcionamento do sistema é imposto que este cumpra os seguintes requerimentos:

- Cobertura de 360 graus;
- Massa inferior a 100g;
- Tensão operacional de 5 a 12 V;
- Alcance dos sensores, para leituras precisas, de 10 metros;
- Qualidade de aquisição de dados para um voo seguro à velocidade operacional do UAV (1,5 a 3 m/s);
- Adaptabilidade posicionamento face à geometria do robô;
- Barramento de comunicação (UART, CAN, RS-232 e RS-485);

1.4 Estrutura do Relatório

O relatório é constituído por 8 capítulos capazes de descreverem todo o desenvolvimento realizado. A organização deste segue uma lógica evolutiva do projeto final, pelo que o relatório foi sempre realizado em paralelo.

No presente capítulo é feito uma abordagem genérica ao projeto assim como realçadas as motivações que levaram ao seu desenvolvimento. Foram mencionados alguns cenários de aplicação e listadas todas as funcionalidades que o mesmo deveria de ter.

No Capítulo 2 é feito um estudo atual dos sistemas de *obstacle avoidance*, focando em algumas soluções de sensores ToF e *solid state* LiDAR aplicáveis a AUVs. Como tal, é evidenciado as principais diferenças entre estas duas topologia de sensores.

O seguinte capítulo descreve a análise dos requisitos estipulados assim como uma pré-reflexão face ao estudo das tecnologias anteriormente mencionadas.

O capítulo 4 apresenta de forma simbólica a arquitetura de alto nível do projeto assim como uma análise individual de cada bloco, situando novamente o leitor para o objetivo do projeto.

O capítulo 5 contempla todo o desenvolvimento de *hardware* efetuado, no que diz respeito aos esquemas elétricos e criação da PCB. Adicionalmente é feito uma introdução à lógica de análise de *software* necessária para a solução implementada.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 2

Estado da Arte

A base de um sistema autónomo assenta na sua capacidade de percepção ambiental, seja ela realizada através de radares, lasers e/ou câmaras recorrendo à tecnologia *Light Detection And Ranging* (LiDAR).

Atualmente os drones no mercado possuem excelente sistemas de *obstacle avoidance*, capazes de executar manobras evasivas como navegar em torno de obstáculos estáticos ou parar sem comando manual. *Obstacle avoidance* é um problema que se encontra em desenvolvimento desde à muitos anos, principalmente por diversas marcas fabricantes de drones como: DJI, Walkera, Yuneec, and Skydio. Para tal, estes drones são equipados principalmente com os seguintes sensores [12]:

- *Stereo Vision*;
- *Ultrasonic* (Sonar);
- *Infrared*;
- *Monocular Vision*;
- LiDAR;

2.1 *Stereo-Vision*

Stereo-vision funciona de maneira similar à visão humana. Esta é uma técnica capaz de extrair profundidade ou referências de distâncias a partir de imagens. Estes sensores possuem duas câmaras, localizadas à direita e à esquerda. A partir das duas imagens capturadas pelas câmaras, o sensor é capaz de fornecer informação da distância do obstáculo em frente. Essencialmente o sensor tem de identificar, nas duas imagens capturadas pelas duas câmaras, os pixels que correspondem ao mesmo ponto no cenário físico. Deste modo o ponto 3D correspondente, pode ser estabelecido por triangulação. Quanto mais pixels correspondentes forem encontrados, mais informação pode ser retirada do par de imagens [13]. O Mavic 2, da DJI, utiliza múltiplos sensores deste tipo para detectar obstáculos ao seu redor [14].

2.2 *Ultrasonic (Sonar)*

Um sensor *Ultrasonic* envia uma onda sonar de alta frequência e regista quanto tempo decorreu até que o eco tenha sido refletido de volta. Estes sensores possuem duas aberturas. Uma para transmitir as ondas de alta frequência e a outra para receber ondas refletidas. Com base no tempo de eco (t_{eco}) e na velocidade do som (v_{som}) é possível calcular a distância (d) a partir da seguinte Equação 2.1:

$$d = v_{som} \times \frac{t_{eco}}{2} \quad (2.1)$$

Grande parte dos drones no mercado possui sensores deste tipo debaixo do drone para detectar o solo e medir a altitude [13].

2.3 *Infrared*

Este sensor compõe-se principalmente por um transmissor infravermelho, um receptor infravermelho e um potencímetro. Esta tecnologia tira proveito do princípio da reflexão para detetar obstáculos. De acordo com este princípio se o feixe infravermelho, ao longo da sua propagação, não colidir com nenhum objeto, será atenuado e por fim desaparecer. Portanto se o feixe infravermelho, emitido pelo transmissor, encontrar um obstáculo será refletido de volta para o receptor infravermelho. Ao detetar o sinal, confirma que existe um obstáculo. Um exemplo do uso destes sensores em drones é o Phantom 4 Pro da DJI. Este drone possui um sistema de deteção infravermelho no lado direito e esquerdo [13].

2.4 *Monocular Vision*

Semelhante à tecnologia *stereo-vision*, sensores *monocular* conseguem extrair profundidades e referências de distâncias a partir de uma única imagem. Conforme aludido no subcapítulo *Stereo-Vision*, a visão humana utiliza os dois olhos para ter uma percepção de profundidade. No entanto, apesar de ser mais complicado, é possível julgar a profundidade e distâncias com apenas um olho. Tal facto é possível porque o cérebro humano utiliza *Pictorial depth cues* para determinar distâncias entre objetos [13]. Um exemplo disto é: ao visualizar dois objetos do mesmo tamanho, o objeto mais distante aparenta ser menor que o outro, apesar de serem do mesmo tamanho. As *Monocular cameras* utilizam um algoritmo capaz de detetar *Pictorial depth cues* na imagem capturada para que desta forma consiga determinar distâncias entre objetos e obstáculos [15]. Uma grande vantagem destes sensores é o seu reduzido custo. O drone Parrot AR 2.0 está equipado com dois sensores deste tipo, um à frente o outro na parte inferior, para detetar obstáculos em tempo real com recurso a *machine learning*.

2.5 LiDAR

A tecnologia *Light Detection And Ranging* (LiDAR) será abordada com mais detalhada, dado a relevância para o tema do projeto. Desta forma, são apresentadas algumas soluções, aplicadas a drones, para deteção de obstáculos, que existem no mercado. O sensor LiDAR, apesar de se tratar de uma tecnologia ótica, funciona de forma similar a um sonar. Da mesma forma que o sonar utiliza a velocidade do som para calcular uma distância, o LiDAR mede as propriedades da luz reflectida de modo a obter a distância e/ou outra informação a respeito um determinado objecto distante. No contexto de obstacle avoidance para drones são utilizados dois tipos de LiDAR: *Mechanical LiDAR* e *Solid State LiDAR*.

2.5.1 *Mechanical LiDAR*

O LiDAR mecânico fixa o transmissor e receptor laser num eixo rotativo, que com a actuação num motor girar o referido eixo enquanto o transmissor e receptor laser obtém uma nuvem de pontos do ambiente em volta.

Existem dois tipos de LiDAR mecânicos com eixos rotacionais: *single-Line LiDAR* e *multi-line LiDAR*. Esta classificação é estipulada pelo número de pares de transmissores e receptores laser. O *Single line LiDAR*, indicado para mapeamento 2D, efetua vários *scans* horizontais enquanto o seu eixo gira. Por sua vez, *multi-line LiDAR*, indicado para mapeamento 3D, cria um *Field of View* (FoV) vertical, capaz de realizar um *scan* com um determinado ângulo a partir de múltiplos lasers empilhados (Figura 2.1) [16].

Como referido anteriormente, o LiDAR obtém a distância desde o centro do sensor até ao ponto de reflexão a partir do método ToF. Estas distâncias são posteriormente traduzidas para coordenadas que por sua vez são armazenadas numa nuvem de pontos.

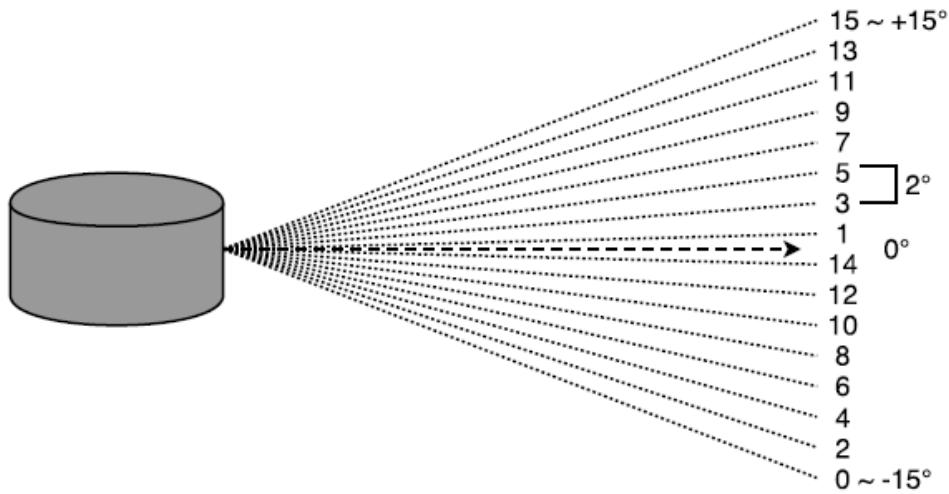


Figura 2.1: Velodyne VLP-16 laser stack [2].

Velodyne 16-line LiDAR

O Velodyne 16 (VLP-16) é um multi-line LiDAR produzido pela Velodyne. Este sensor, ilustrado na Figura 2.2, oferece um FoV horizontal e vertical de 360° e 30° ($+15^\circ$ a -15°) respectivamente. Além do seu excelente FoV, apenas pesa 830 gramas, possui um range de 100 metros e apenas consome 8 watts. Fruto de todas estas características é obviamente uma excelente escolha para pequenos UAVs na tarefa de detecção e prevenção de obstáculos, porém, mesmo com todo o avanço nesta área tecnológica, continua ser um produto caro [17].

Conforme mencionado, este LiDAR utiliza o método de *Time of Flight* para adquirir as distâncias desde o ponto de *scan* até ao alvo (d). Na prática o transmissor emite um pulso laser que por sua vez é projectado sobre um obstáculo e naturalmente refletido. Sucessivamente, o receptor recebe este feixe refletido. A partir da diferença de tempo (Δt) entre estes dois eventos,

a distância é calculada, na Equação 2.2, através a velocidade da luz (c) [16].

$$[h]d = c \times \frac{\Delta t}{2} \quad (2.2)$$

Desta forma, com 16 pares de transmissores e receptores e velocidade de rotação variável de 5 Hz a 20 Hz este sensor é capaz de gerar 300 000 pontos por segundo em *single mode* ou o dobro em *dual mode*, com um precisão ± 3 cm [18].



Figura 2.2: 16 line LiDAR - *Velodyne* VLP-16 [3].

2.5.2 Solid State LiDAR

A tecnologia *solid state LiDAR* está a ganhar mercado, mostrando ser uma solução promissora face ao tradicional LiDAR no que diz respeito ao preço, fiabilidade e precisão.

O *solid state LiDAR* é constituído inteiramente por um chip de silício e, comparativamente ao LiDAR eletromecânico, não conta com peças móveis, eliminando a suscetibilidade a perturbações intrínsecas [4]. A tecnologia em causa utiliza pulsos de luz gerados por diódos laser ou *light emitting diodes* (LED).

O processo de operação deste LiDAR é idêntico ao *phase array* no rádio para obtenção de um *optical phased array*(OPA). São emitidos rajadas de

fotões, numa única direção, segundo padrões e fases específicas (Figura 2.3). O foco e tamanho deste feixe é, por norma, configurável digitalmente. Ainda assim, um sensor *solid state* LiDAR apresenta um *field of view*(FoV) reduzido dado ao baixo comprimento de onda da luz emitida.

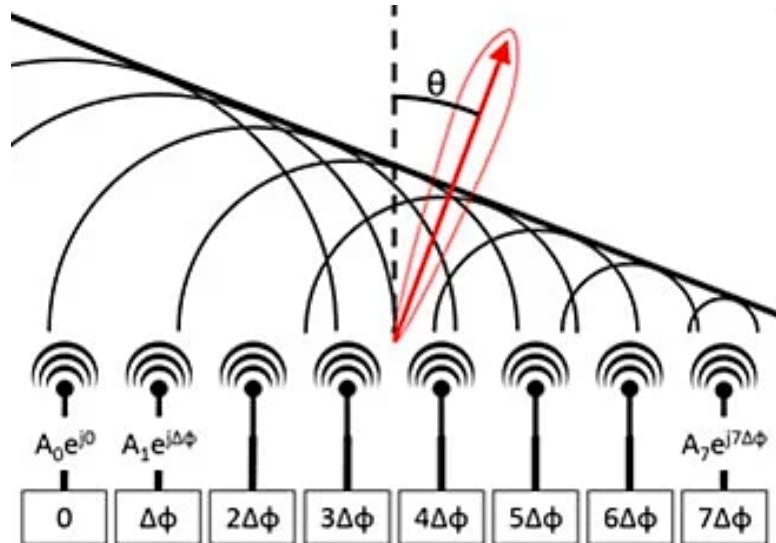


Figura 2.3: Optical Phased Array [4].

Os fotões emitidos ao colidirem com o obstáculo e retornarem são distribuídos por cada pixel da matriz foto-detetora, garantindo assim que a potência do sinal seja fortemente distribuída. Assim, o sensor utiliza a mudança de fase entre a luz emitida e a luz recebida. Isso permite calcular a distância entre o robô e o obstáculo. A distribuição dos fotões recebidos pela matriz leva à ocorrência de uma baixa relação sinal-ruído (SNR) mas à limitação da resolução deste sensor LiDAR, uma vez que não é realizada nenhuma varredura de fotões e a matriz receptora é por norma reduzida [19].

No entanto, segundo o CalTech e DARPA, esta tecnologia ainda se encontra num estado inicial, existindo a longo caminho até ser possível substituir completamente os sensores LiDAR mecânicos [19]. Ainda assim, existe a possibilidade de conciliar vários *solid state* LiDARs e aumentar o alcance

do sistema implementado.

Soluções Terabee

A Terabee oferece uma variedade de soluções compactas e flexíveis que operam em diversos cenários e robôs. O TeraRanger Hub Evo é uma plataforma capaz de acoplar até 8 TeraRanger Evo permitindo o desenvolvimento de *collision sensor array*. Os TeraRanger Evo são sensores ToF com distâncias e tamanhos diferentes, podendo realizar leituras até 60 metros e não contribuindo com mais de 100 gramas para o peso final do UAV. No entanto, a sua utilização fica limitada a aplicações internas.

Assim como os vários dispositivos de deteção de obstáculos, ao operar *outdoor* ocorre uma diminuição da propagação dos fotões do feixe e portanto a uma redução da potência do feixe refletido. Para drones, cujo a navegação exija uma exposição solar ou escuridão total, a Terabee apresenta o TeraRanger Tower Evo (Figura 2.4). Este sistema é capaz de detetar vários obstáculos num intervalo de distâncias entre 0,5 m e 60 m através de uma taxa de atualização de 120 Hz, estando o UAV em movimento [5].



Figura 2.4: TeraRanger Tower Evo - *solid-state* LiDAR [5].

O sistema não depende de partes móveis para fornecer uma cobertura “completa” de 360 graus. A aplicação de apenas 4 módulos de sensores de distância ToF (TeraRanger Evo 60m e/ou Evo 600Hz) apresenta um peso inferior a 100 gramas, nomeadamente 92 gramas. Já a montagem total do

sistema, com os 8 sensores ToF chega a um peso de 135 gramas. No entanto, o facto de ser leve ajuda a minimizar o consumo de bateria, maximizando os tempos de voo [5].

O TeraRanger Tower Evo é compatível com sistemas Pixhawk *ArduPilot Mega* (APM) através de uma interface I2C. Adicionalmente os dados podem ser analisados em tempo real através da interface USB ou UART [5].

O sensor em causa apresenta um *field of view* de 2 graus. Naturalmente esta emissão de luz não prejudica a visão humana, respeitando a classe 1 para lasers [5].

Soluções Hypersen

A Hypersen distingue os seus sensores, entre outros, por 3D *solid state* LiDAR e ToF *Ranging Sensors*.

A série de sensores ToF HPS-167 apresenta algumas características relevantes, nomeadamente baixo SNR aliado de um algoritmo de processamento de luz ambiente, temperatura e compensação de cor. Apesar disso possui um peso consideravelmente superior face à solução anterior, com um menor *field of view* [20].

A alternativa ao *solid state* LiDAR denomina-se HPS-3D160 Pro e é capaz de analisar ambientes 3D com distâncias configuráveis (máximo 8 metros), *field of view* de 76°(Horizontal) por 32°(Vertical) e qualidade de feixe ajustável. Além disso conta com diversas interfaces de comunicação, sejam elas USB, RS-232, USB-IO, LAN e com a velocidade do gerador de tramas configurável. Porém, o peso unitário por sensor é relativamente elevado (110 gramas) [20].

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 3

Análise de Requisitos

A realização de uma avaliação completa e devidamente justificada assumem parte fulcral da análise de requisitos. Assim, neste capítulo, procura-se, de acordo com os objectivos estabelecidos, caracterizar os principais requisitos e, se necessário, a sua devida contestação, expondo de forma clara e objectiva potenciais alterações.

3.1 Cobertura de 360 graus

Conforme mencionado, o desenvolvimento do subsistema em causa exige, nos diversos cenários, uma análise rigorosa do ambiente em torno do UAV. A tecnologia adoptada deve ser capaz de realizar, idealmente, uma cobertura de 360 graus.

Para isso, o *field of view* (FoV) máximo fornecido pelo sensor ToF deve ser considerado. Um maior campo de visão contribuirá para a redução do número de sensores, assim como o consumo e peso do módulo final.

Tipicamente, um aumento do FoV leva a uma maior distribuição dos fotões emitidos pela área considerada. Este efeito resulta numa aquisição maior de dados, porem leva a uma redução considerável da potencia do feixe de retorno.

No momento de aplicação do módulo de sensores será necessário avaliar o seu posicionamento no drone. Contudo, a solução desenvolvida deverá atingir apenas uma cobertura parcial do ambiente em torno do UAV, podendo o obstáculo, em situações de proximidade extrema, não ser detetado.

A Figura 3.1) ilustra diferentes FoVs para um sensor LiDAR com um sistema mecânico e um conjunto de sensores ToF com abertura reduzida.

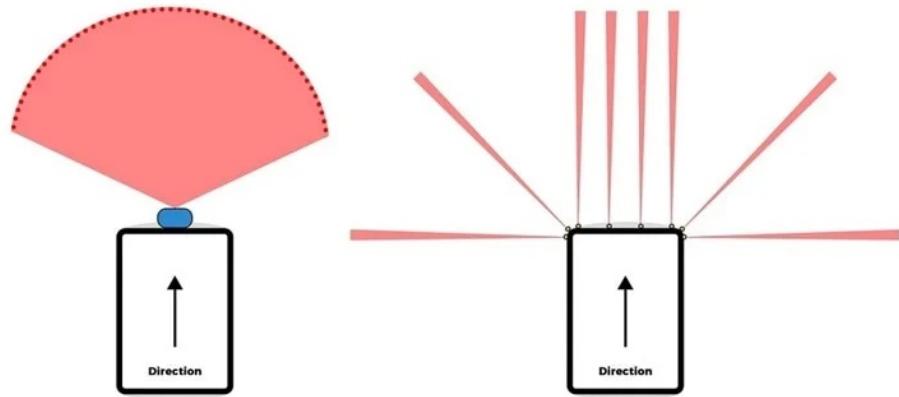


Figura 3.1: *Mechanical LiDAR vs solid state LiDAR* [6].

3.2 Massa inferior a 100g

No desenvolvimento de sistemas que dependam de uma fonte de energia escassa, todos os consumos devem ser tidos em conta. É sabido que uma fuga não pretendida ou evitável de energia (*i.e.* corrente) pode comprometer tempos de voo e cumprimento de objectivos. Assim sendo, a adição de um peso ao UAV que origine um maior débito de potência aos motores deve ser devidamente justificado.

Aliado a este facto, a sua disposição não deve alterar o centro de massa do robô, devendo por isso de existir uma correta distribuição de massas. Portanto, a colocação de um sensor num dos pólos do UAV exige a aplicação nos restantes.

Tendo em conta todo o estudo de mercado efetuado nos capítulos anteriores e a análise aqui apresentada sugere-se um aumento do limite de massa para 150 gramas de forma a criar um sistema capaz de acoplar pelo menos 8 sensores ToF.

3.3 Tensão operacional de 5 a 12 V

O módulo capaz de acoplar todos os sensores ToF deve operar segundo a tensão definida pelas baterias do UAV, contudo, o estudo de um conversor de tensão que admite valores superiores (*e.g.* 24 V) pode ser necessário. Este deve apresentar baixo consumo energético e elevado rendimento.

Deve-se então estipular os limites de tensão do produto em função das futuras exigências definidas por cada sensor.

3.4 Alcance dos sensores de 10 metros

Tipicamente o alcance do sensor (distância pela qual este consegue captar dados fidedignos) pode variar com fatores ambientais (*i.e.*, aplicações indoor ou outdoor, presença de humidade, temperatura, etc), cor do obstáculo e tipo de modulação usada no sinal enviado.

A *performance* do LiDAR pode reduzir-se consideravelmente uma vez que estamos na presença de um dispositivo ótico. Aliado a este facto, a precisão é igualmente condicionada devido à ocorrência de potenciais ruídos no sinal refletido.

Uma vez que a tecnologia em causa utilizar pulsos de luz gerados por dióodos laser ou *light emitting diodes* (LED) a distância em causa pode ver-se condicionada para garantir uma elevada frequência de feixes, boa precisão e baixo consumo energético.

A escolha do sensor utilizado no projeto deve considerar, além do tamanho, peso, baixo consumo energético, frequência de operação e influencia a

luz ambiental, a máxima distância de deteção de obstáculos, possibilidade de *multi-targets* e a capacidade de alteração do FoV.

3.5 Aquisição de dados a diferentes velocidades (1,5 a 3 m/s)

Além da distância ao obstáculo e do respetivo tempo que decorrido entre a emissão do feixe de luz e receção dos fotões refletidos, a velocidade do corpo que carrega o sistema de sensores é igualmente uma variável a considerar.

O tempo de aquisição de dados não deve de alguma forma limitar a *performance* do módulo pelo que deve haver um sobredimensionamento capaz de proporcionar segurança ao utilizador do UAV. A velocidade de propagação dos fotões corresponde à velocidade da luz, no entanto, a quantidade de feixes emitidos é definida pelo fornecedor.

Apesar destas condicionantes, a topologia de sensores em causa não deve apresentar maiores dificuldades na aquisição de dados perante as velocidades exigidas.

3.6 Adaptabilidade posicionamento face à geometria do robô

As soluções recorrendo à tecnologia *solid state* LiDAR apresentaram-se no mercado com tamanhos consideravelmente reduzidos, isto fruto da sua constituição simples, livre de componentes mecânicos móveis.

Naturalmente, o campo de visão apresentar-se condicionado, pelo que para cobrir um ângulo maior é necessário mais sensores. Como tal, o seu peso e tamanho reduzido permitem a aplicação em diversas zonas, não possível nas anteriores tecnologias.

3.7 Barramento de comunicação (UART, CAN, RS-232 e RS-485)

A aquisição do sinal por parte do sensor deve ser posteriormente processado. Idealmente, o processo deve ser realizado em tempo real, com o mínimo de latência. Para tal é necessário compreender os requisitos dos possíveis utilizadores e procurar desenvolver uma interface de comunicação que seja compatível com os barramentos disponíveis.

É habitual encontrar interfaces de comunicação UART, I2C, RS232 e por vezes *Local Area Network* (LAN) entre este tipo de módulos e o dispositivo central do UAV.

Os tipos de interface mencionados podem ser facilmente definidos com circuitos *transceivers*, sendo que para a aplicação em causa, futuramente, deverá de ser avaliado qual destas apresentará real relevância para o desenvolvimento da placa que acoplará todos os sensores.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 4

Arquitectura de Alto Nível

A arquitetura de alto nível procura transparecer ao leitor, através de um ou mais diagramas de blocos, as camadas, módulos e principais componentes do sistema a serem desenvolvidos, a fim de atingir os requisitos funcionais do projeto.

O nível de detalhe proporcionado leva a uma compreensão simbólica das interfaces de comunicação entre dispositivos da mesma rede e com o exterior, assim como as suas ligações lógicas. Além disso, é possível agrupar um conjunto de funcionalidades base que se pretendem ver ser cumpridas no futuro, fruto da topologia selecionada. Para tal são mencionadas as suas vantagens e desvantagens.

4.1 Arquitetura Centralizada

Sistemas centralizados são sistemas que utilizam a arquitetura *master/slave*. Nesta arquitetura um ou mais *slave nodes* são diretamente conectados a um *master node*. A topologia estrela segue esta arquitetura. Assim sendo, cada dispositivo envolvido deve conectar-se a um nó central, estando este alocado ao controlo transferência de dados.

As suas vantagens prendem-se na simplicidade de implementação e a

deteção de erro, uma vez que a falha de um dispositivo não surte impacto na rede. No entanto, existe uma dependência acrescida do nó central, uma vez que na falha do mesmo toda a rede fica condicionada.

A Figura 4.1 representa o desenho de alto nível seguindo esta topologia.

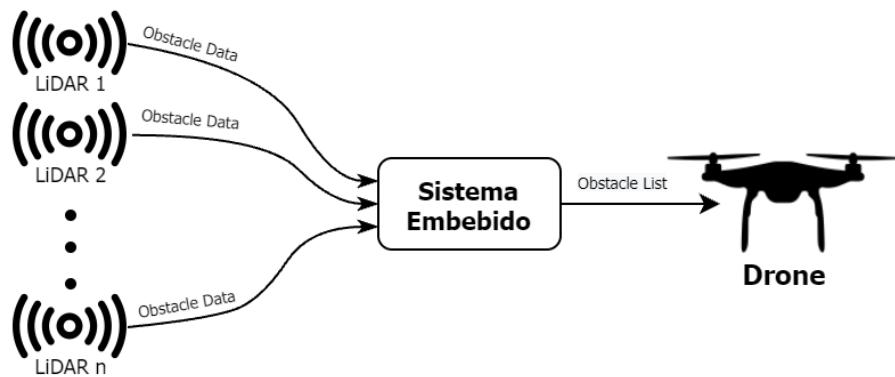


Figura 4.1: Arquitetura de alto nível centralizada.

Todos os n LiDAR estão conectados ao sistema embebido central. Cada LiDAR deverá enviar para o microcontrolador os dados necessários, para o cálculo das respectivas distâncias aos obstáculos. Após este cálculo, o sistema embebido converte as distâncias resultantes em coordenadas, considerando o drone como ponto referência, assim como a posição e direção de cada LiDAR. Neste momento, o microcontrolador deve ser capaz de enviar a informação ao UAV.

A troca de dados entre o sistema central e os sensores LiDAR pode, de certa forma, ser realizada com recurso a uma interface de comunicação série. O sensor escolhido deve estar apto a comunicar com a interface de comunicação selecionada. Do lado da comunicação com o drone existe a possibilidade de comunicação recorrendo a UART, CAN, RS-485 e RS-232.

4.2 Arquitetura Distribuída

Alternativamente, uma arquitetura distribuída apresenta ligeiras diferenças na interligação dos sensores com o sistema embebido. A topologia *daisy chain* pode-se enquadrar neste cenário uma vez que a conexão de cada nó ao nó seguinte é feita em ligação em cadeia, *i.e.*, em série.

Esta rede pode ter duas formas básicas, nomeadamente linear (transmissão de informação unidirecional do emissor até ao fim da rede) ou em anel (passagem bidirecional de informação). Assim, se a mensagem, *e.g.*, trama de bytes, for destinada a um dispositivo no meio da rede, todos os intervenientes irão repassar a mesma até chegar ao seu destino. A topologia *daisy chain* linear torna-se vantajosa em relação à cadeia anel pois não são exigidos barramentos bidirecionais. No entanto, se a comunicação em anel for interrompido, a transmissão ocorre no caminho inverso, garantindo que a conectividade entre dispositivos não é afetada.

Apesar disto, esta rede com topologia linear apresenta baixa confiabilidade uma vez que a interrupção do barramento entre dois dispositivos condiciona o resto do sistema. Porém, no caso de topologia em anel, verifica-se uma imediata reorganização da rede em resposta à falha de um barramento. Além disso, o número de nós na rede é limitado, dependendo da capacidade de transmissão do dispositivo emissor. Cada dispositivo contribui com uma carga para a rede, pelo que a adição de mais provoca um aumento da latência na transmissão de dados.

Os intervenientes presentes nesta arquitetura são os mesmos que na arquitetura centralizada. Contudo, no momento de seleção do tipo de sensor será necessário averiguar se este possui uma interface de comunicação capaz de comunicar numa topologia *daisy chain*.

Na Figura 4.2 é possível verificar a disposição desta topologia. Nesta é visível que o primeiro sensor se conecta diretamente ao segundo e este ao seguinte até ao sensor n . O último LiDAR transmitirá, através da interface

selecionada, a trama requisitada ao sistema embebido que a deverá processar e condicionar para enviar um conjunto de dados relevantes à navegação do drone.

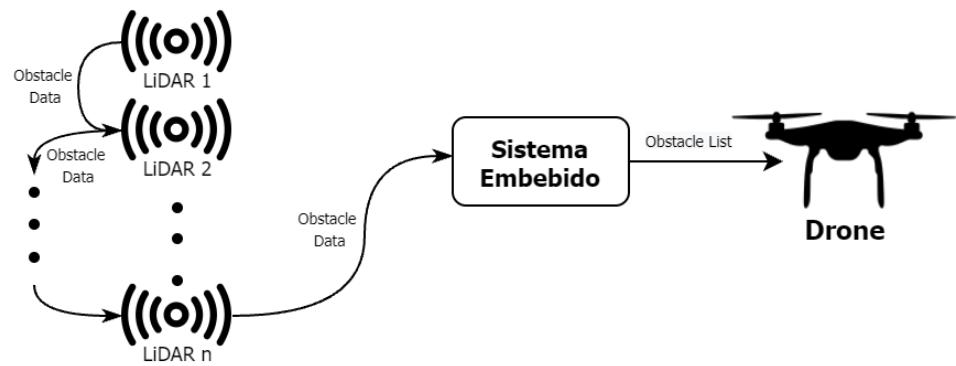


Figura 4.2: Arquitetura de alto nível distribuída.

Torna-se notório a vantagem deste sistema, uma vez que o acoplamento de sensores não exige maior alteração de *hardware*. Além disso, apenas será requisitado uma interface de comunicação do sistema embebido, facto que não é possível numa topologia em estrela.

Assim sendo, na topologia *daisy chain* é obrigatório a definição do endereço de cada sensor, evitando colisões de informações no barramento. Por outro lado, a falha de um dispositivo leva ao condicionamento imediata das linhas de comunicação.

Capítulo 5

Projecto

Este capítulo descreve o estudo inerente à escolha da melhor implementação capaz de cumprir os objetivos previamente estipulados. Adicionalmente será feito um estudo superficial a uma solução previamente desenvolvida para a deteção de obstáculos com recurso a sensores ToF e LiDAR.

Por sua vez, apresenta-se uma proposta de projeto capaz de aprimorar o sistema enunciado. Para tal será feito um estudo do mercado para escolha do sensor em causa, assim como uma análise das condicionantes na seleção de um MCU capaz de gerir todo o processamento de dados e estabelecer, de forma controlada, uma comunicação com o exterior, seja ela através de um barramento CAN com o módulo previamente desenvolvido, ou com os respetivos sensores de deteção de obstáculos.

5.1 Arquitectura do Sistema

5.1.1 Análise ao Sistema Previamente Desenvolvido

Para complementar o módulo anteriormente desenvolvido será necessário averiguar o seu posicionamento na rede e a forma como outros sistemas serão capaz de efetuar uma troca de informação com o computador central do drone.

Os módulos apresentados seguem a arquitetura genérica presente na Figura 5.1.

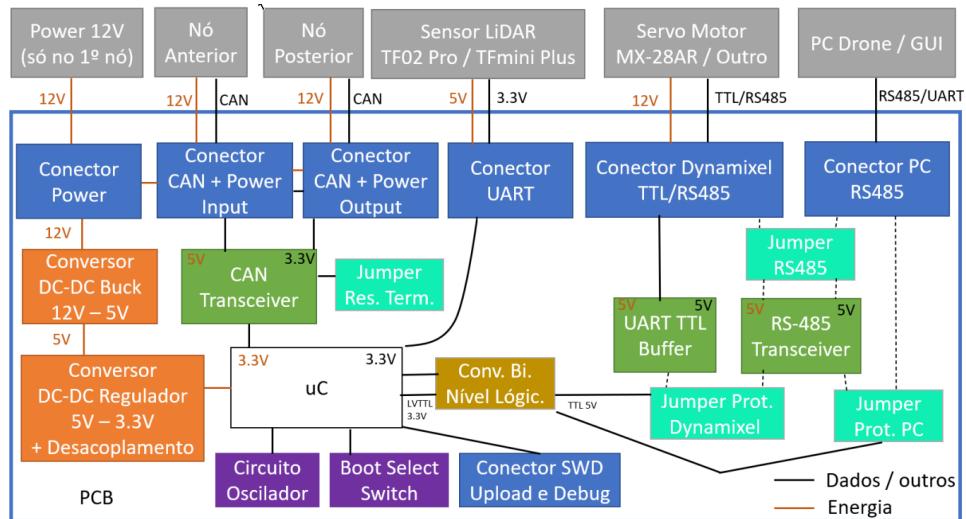


Figura 5.1: Arquitectura sistema previamente desenvolvido

Circuito de Alimentação

O módulo concebido apresenta dois níveis diferentes de tensão obtidos a partir de uma tensão externa regulada de 12 V.

Recorrendo a um *switching regulator*, o TPS54331 da Texas Instruments, é obtida a tensão de 5 V responsável por alimentar o *transceiver* SN75176AD para a comunicação RS-485 com o servo-motor, o sensor LiDAR selecionado (TF02 Pro ou TFmini Plus), o *transceiver* TJA1051T para a comunicação CAN e o regulador linear AMS1117 - 3,3V.

A partir de um regulador linear referido é obtida a tensão de 3,3 V capaz de alimentar o microcontrolador principal da placa e o CI (Circuito Integrado) 74HC126, um buffer de transmissão de dados durante a comunicação UART com o servo-motor.

Interfaces de Comunicação

A placa é dotada de vários protocolos de comunicação internos porém, a sua interligação com uma rede externa acontece através da interface de comunicação CAN, um protocolo robusto e flexível de operar. O *transceiver* TJA1051T adapta o microcontrolador em causa aos *standards* elétricos deste protocolo. De notar a existência de um jumper que possibilita a ligação, por intermédio de uma resistência de terminação, das linhas de sinal *CAN High* (CANH) e *CAN Low* (CANL), nos dois extremos da comunicação, conforme exigido pelo protocolo.

Os sensores selecionados possuem três interfaces de comunicação (USART, I^2C e I/O) porém, para uma comunicação série foi utilizada a interface USART.

A comunicação com o computador de bordo é limitada ao módulo *master* através do protocolo RS-485 e exige a seleção dos jumpers que definem a direção do *transceiver* para o PC.

Sensores LiDAR

Para recolha de informação em torno do UAV foram adotados os sensores TF02-Pro e TFmini-Plus, tendo este projeto, previamente desenvolvido, realizado testes apenas com o segundo sensor.

O facto de serem compactos, admitirem um consumo reduzido de energia para médios alcances e a sua aplicação pouco influenciar nos movimentos do drone, fruto da sua baixa massa, torna-os ótimos candidatos.

Microcontrolador

O centro de processamento é conseguido à custa de um microcontrolador de 32 bits com arquitetura ARM, o STM32F103RBTx. Este cumpre a exigências estipuladas, na medida em que apresenta um barramento de comunicação I^2C (*Inter-Integrated Circuit*), três barramentos de comunicação

por USART/UART, capacidade de debug via Serial Wire (SWD), e 3 General Purpose Input Output (GPIO) conseguindo então fazer toda a gestão interna e externa dos componentes existentes e respetiva troca de dados.

5.1.2 Proposta de Projeto

Este projeto propõe desenvolver um módulo compacto numa placa de circuito impresso (PCB) com o propósito de auxiliar a placa previamente desenvolvida. Este módulo auxiliar deve ser capaz de suportar até oito LiDARs estáticos, processando todos os dados adquiridos e comunicá-los à placa principal através do barramento *Controller Area Network* (CAN).

CAN é um barramento de comunicação série desenvolvido para operar em ambientes adversos, capaz de oferecer um desempenho robusto e flexível sendo particularmente utilizado em aplicações industriais e automotivas.

O protocolo CAN opera no *data link layer* e no *physical layer* do *Open Systems Interconnection* (OSI). É então possível implementar uma *low-level networking* para comunicações robustas e que exijam elevada velocidade de troca de dados.

Esta nova arquitetura pode ser observada na Figura 5.2.

Tal como referido o módulo *slave* vai comunicar com módulo *master* através do protocolo CAN, para tal é necessário implementar um *transceiver* que transforme o sinal de saída do microcontrolador para o *standards* deste protocolo. É ainda adicionado um jumper, utilizado nos dois extremos da ligação CAN.

Para o microcontrolador é adicionado um oscilador externo para obtenção de maior precisão e estabilidade nos sinais de *clock*. Para programar este MCU é adicionado um terminal macho com acesso aos pinos SWD.

A troca de dados, no protocolo de comunicação I^2C , com os oito LiDARs é implementado através de oito conectores. A comunicação I^2C permite conectar múltiplos *slaves* a um único *master*. Tal como o protocolo USART,

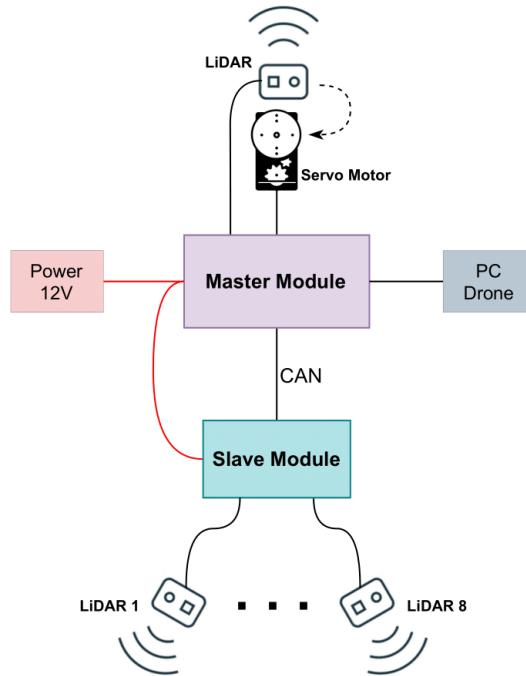


Figura 5.2: Arquitectura do sistema

o I^2C apenas recorre a dois canais para estabelecer uma comunicação bidirecional (sinal de dados e sinal de *clock*). No entanto, comparativamente ao USART, possui um hardware menos complexo.

A comunicação com o computador de bordo será possível sempre que esta placa atue como *master* na rede CAN referida. Para isso é instalado um conector sujeito à transmissão de dados no modo diferencial RS-485 ou série, diretamente da USART do microcontrolador. Apenas uma situação pode ocorrer, pelo que deve haver um sistema de seleção do formato de dados a enviar.

Um sistema dotado pelo padrão RS-485 (norma TIA-485 ou EIA-485) é capaz de transportar informação ao longo de cabos com longas distâncias sujeitos a ambientes com ruído eletromagnético, contribuindo beneficamente para a *Electromagnetic Compatibility* (EMC). O sistema atua na camada

física de diversos protocolos para uma comunicação série ponto a ponto entre dispositivos, podendo estes ser interligados de diversas formas. A comunicação com recurso a RS-485 utiliza duas linhas de sinal que devem estar equilibradas (i.e., mesma impedância por linha num cabo entrelaçado), entrelaçadas e forma diferencial possibilitando o cancelamento de ruído electromagnético induzido nos dois condutores.

Para alimentação da placa será necessário duas conversões CC-CC a partir da tensão regulada de 12 V. Uma para 5 V e outra para 3,3V.

Todos estes conceitos encontram-se representados na Figura 5.3.

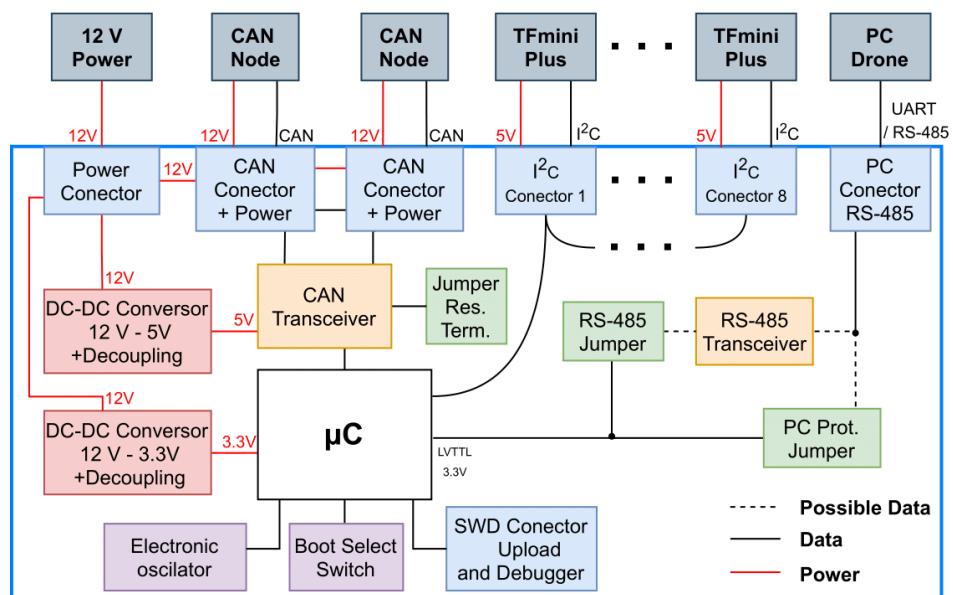


Figura 5.3: Arquitetura do módulo *slave*

5.2 Opções de Projeto

Neste subcapítulo serão apresentadas as várias opções técnicas no âmbito da proposta de projeto, reunindo assim uma avaliação do mercado atual para a seleção do melhor sensor LiDAR tendo em conta aspectos como a velocidade e alcance máximo na aquisição de dados, peso, consumo do sistema e limites

de operação em ambientes excessivos, *i.e.* elevado nível de luminosidade.

É completada a análise com um estudo de alguns dos microcontroladores ARM de 32 bits apresentados pela STMicroelectronics nas três famílias, procurando estabelecer uma gestão controlada dos vários componentes.

5.2.1 Sensores LiDAR

Averiguar os diferentes sensores LiDAR no mercado é uma parte crucial para desenvolvimento deste projeto. Tendo em conta a variedade destes sensores é essencial escolher o tipo certo que seja adequado para as necessidades do projeto.

STMicroelectronics's 4th generation of FlightSense

STMicroelectronics (ST) foi uma das primeiras fabricantes a desenvolver a tecnologia ToF. O *FlightSense* é a quarta geração do produto ToF da ST. Este sensor consiste num módulo, constituído por um emissor, receptor e um processador. O emissor envia fotões que são reflectidos pelo receptor. A diferença de tempo entre a emissão e a recepção fornece a distância real do alvo. As principais vantagens desta solução é o seu tamanho, o baixo consumo de energia e capacidade de executar medições rápidas e precisas. No entanto o seu alcance máximo não é ideal, principalmente quando aplicado *outdoor*.

Esta família de sensores possui diversas alternativas, na Tabela 5.1 são comparadas algumas características dos sensores que se enquadram no contexto do projeto [21].

Tabela 5.1: Características dos sensores da ST

	<i>FlightSense</i>	VL56L3CX	VL56L1	VL53L5CX
Dist. Máxima	500 cm	800 cm		400 cm
Dist. Mínima	4 cm	4 cm		4 cm
Ranging Freq.	30 Hz	60 Hz		60 Hz
FoV	25º	até 27º		25º
Corrente Média	16 mA	16 mA		45 mA
Interface	<i>I²C</i>	<i>I²C</i>		<i>I²C</i>
Preço¹	4.91 \$	7.35 \$		9.80 \$
<i>Ranging performances</i>	<i>Indoor²</i>	<i>Outdoor³</i>	<i>Indoor⁴</i>	<i>Indoor²</i>
<i>White Target(88%)</i>	400 cm	170 cm	320 cm	90 cm
<i>Grey Target(17%)</i>	240 cm	100 cm	230 cm	90 cm
			170 cm	90 cm

Benewake LiDARs (TFmini Plus, TFmini-S e TF-Luna)

O TFmini Plus, TFmini-S e TF-Luna são *single-point ranging* LiDARs baseados no princípio ToF, produzidos pela Benewake. Apesar destes três sensores possuírem características e vantagens distintas os três compartilham o facto de serem pequenos e leves, eficientes no consumo de energia, *low-cost*, resistentes à luminosidade externa e permitem executar medições a uma frequência elevada [25], [26], [27].

A Tabela 5.2 reúne as principais características destes três sensores:

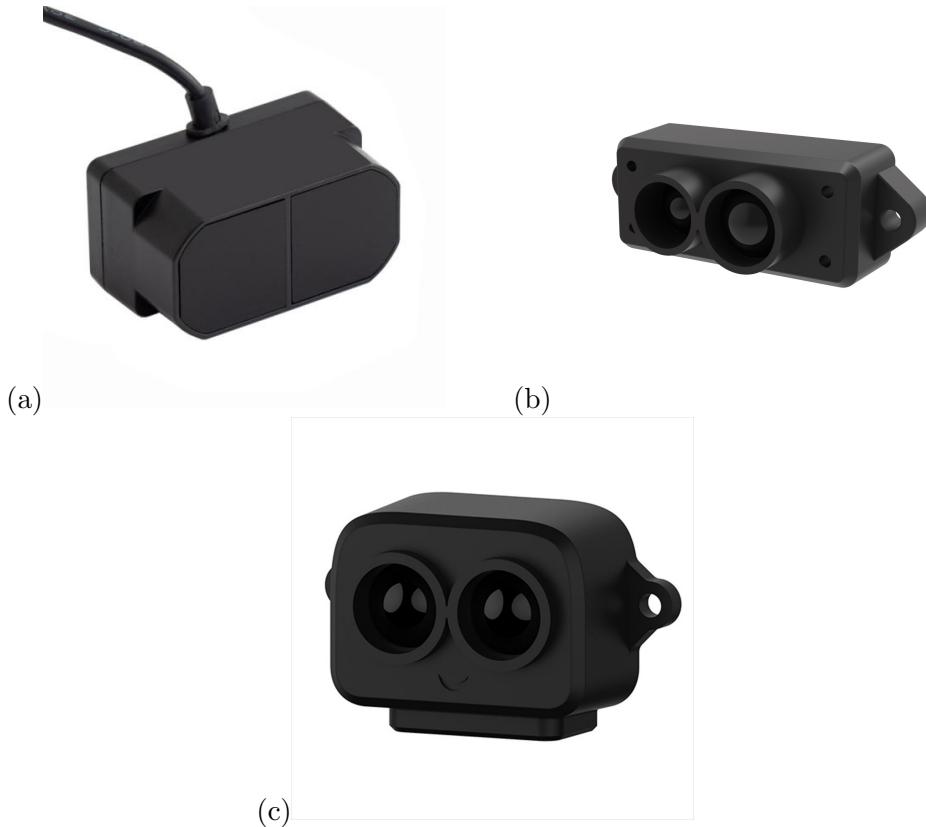


Figura 5.4: TFmini Plus [25] (a), TFmini-S [26] (b), TF-Luna (c) [27]

¹Preços retirados da loja oficial da ST, para a quantidade de 1 produto [22]

²Testes realizados para um FoV máximo, sem contribuição da luz [23]

³Testes realizados para um FoV máximo, sendo a contribuição da luz 1.2 W/m^2 [23]

⁴Testes realizados para um FoV máximo, sendo a contribuição da luz 0.7 W/m^2 [24]

⁵Testes realizados para um FoV máximo, sendo a contribuição da luz 2 W/m^2 [24]

Tabela 5.2: Características dos sensores da Benewake

	Benewake LiDAR	TFmini Plus	TFmini-S	TF-Luna
Dist. Máxima	12 m @90% Reflectivity 4 m @10% Reflectivity	12 m @90% Reflectivity 7 m @10% Reflectivity	8 m @90% Reflectivity 2.5 m @10% Reflectivity	8 m @90% Reflectivity 2.5 m @10% Reflectivity
Dist. Mínima	0.1 m	0.1 m		0.2 m
Light resistance	70 Klux	70 Klux		90 Klux
Precisão	±5cm@ (0.1-5m) ±1%@ (5m-12m)	±6cm@ (0.1-6m) ±1%@ (6m-12m)		±6cm@ (0.2-3m) ±2%@ (3m-8m)
FoV	3.6º	2º		2º
Peso	12g±1g	5g±0.3g		<5g
Frame rate	1-1000 Hz @ UART 1-100 Hz @ I^2C	1-1000 Hz @ UART 1-100 Hz @ I^2C		1-250 Hz
Corrente Média	110mA	≤ 140mA		≤ 70mA
Interfaces	UART e I^2C	UART e I^2C		UART e I^2C
Nível de proteção	IP65	none		none
Preço⁶	43.66 €	38.41 €		21.87 €

Hypersen solid-state LiDAR (HPS-3D160 Pro)

Esta alternativa da Hypersen utiliza a tecnologia *solid state* LiDAR para adquirir distâncias até 8 m (90 % *refletion white target*). O destaque desta solução é o facto de se tratar de um sensor *solid state* LiDAR que possui um FoV amplo possibilitando uma grande cobertura. Tudo reunido num único sensor relativamente *low-cost* [28]. A Tabela 5.3 apresenta as principais características do sensor.

Tabela 5.3: Características do sensor HPS-3D160 Pro

Parâmetro	HPS-3D160 Pro
Dist. Máxima	8 m @90% <i>Reflectivity</i> 3 m @10% <i>Reflectivity</i> (80 Klux)
Dist. Mínima	0.25 m
Precisão	± 2cm
FoV	76°(Horizontal), 32°(Vertical)
Peso	110 g
Frame rate	35 Hz
Nível de proteção	IP67
Interface	USB, RS232, USB-IO, LAN
Preço⁷	247 €



Figura 5.5: Solid State lidar HPS-3D160 Pro [7]

⁶Preços retirados da loja online Mouser Electronics, para a quantidade de 1 produto

⁷Preço retirado da loja online Direct Industry, para a quantidade de 1 produto [7]

LeddarTech Leddar Vu8

Tal como o sensor anterior, o Leddar Vu 8, da LeddarTech, é um *solid state* LiDAR. As principais diferenças ao Hypersen limitam-se ao FoV e o alcance conseguido. Enquanto o HPS-3D160 Pro possui um amplo FoV em ambas direções, o Leddar Vu 8 apenas oferece um FoV amplo numa orientação, porém tem um alcance muito superior. Além disto, a solução da LeddarTech oferece múltiplas configurações, como montagem horizontal ou vertical, com FoV horizontal variável desde os 16º aos 99º (condicionando, naturalmente, o alcance máximo) [29]. A Tabela 5.4 representa as principais características de uma configuração de FoV médio de assemblagem horizontal.

Tabela 5.4: Características do sensor VU08-75H0005

Parâmetro	VU08-75H0005
Dist. Máxima	19 m @90% Reflectivity 13 m @18% Reflectivity
Precisão	±5 cm
FoV	48°(Horizontal), 3°(Vertical)
Peso	107.6 g
Frame rate	100 Hz
Nível de proteção	none
Interface	SPI
Preço	247 €

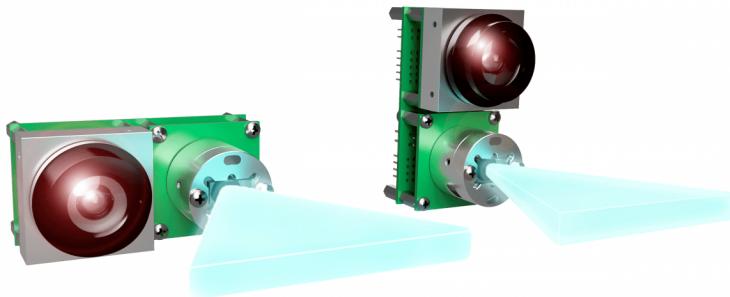


Figura 5.6: Solid State lidar Leddar Vu8 [7]

5.2.2 Microcontroladores STM32

Selecionar o microcontrolador correto para o projeto pressupõe realizar uma avaliação em vários fatores, sejam eles desempenho, custo, consumo de energia e as ferramentas de *software* e *hardware* disponíveis.

Aliado a estes fatores, é importante haver uma vasta comunidade em geral para fornecimento de suporte, além do próprio fornecedor.

Os microcontroladores de 32 bits apresentam-se como dispositivos extremamente robustos com características avançadas como *Instruction Pipelining*, *Branch Prediction*, *Nested Vectored Interrupts* (NVI), *Floating Point Units* (FPU) e proteção de memória. Além disto, o seu poder de processamento permite-os suportar *Real-Time Operating Systems* (RTOS), que lhe fornece capacidades de *multitasking* [30].

O MCU selecionado deve ser capaz de atuar como *maste* no barramento *I²C* (*Inter-Integrated Circuit*) previamente definido. Além disso possuir pelo menos duas interfaces de comunicação USART, uma interface CAN, capacidade de realizar *Serial Wire Debug* (SWD) e potencialmente alguns *General Purpose Input Output* nos restantes pinos.

Relativamente à escrita do *software*, a STMicroelectronics proporciona o ambiente de desenvolvimento STM32CubeIDE capazes de impulsionar a criação de código para o dispositivos da família STM32. O ambiente de desenvolvimento conta com diversas características que permitem a criação de software de forma simplificada através de uma *Graphical User Interface* (GUI) e das ferramentas inerentes de um IDE, das quais:

- Uma ferramenta gráfica de configuração de *software*, a STM32CubeMX, capaz de gerar código C para inicialização microcontroladores e microprocessadores STM32;
- Um conjunto abrangente de ferramentas que permite a compilação (GCC - *GNU Compiler Collection*) e realização de debug (GDB - *GNU Project Debugger*, OpenOCD e Segger J-LINK) dos microcontroladores e microprocessadores STM32 (análise de falhas de CPU, registos dos

periféricos e visualização de memória);

- Um conjunto de pré-configurações iniciais para cada MCU e MPU STM32;
- O pacote MCU STM32CubeF4 composto pela *Hardware Abstraction Layer* (HAL), *Low-Layer* (LL) APIs (camada mais próxima do hardware) e um conjunto de serviços *middleware* (RTOS, biblioteca USB, TCP/IP *stack* entre outros).

A STMicroelectronics possui também um programador/*debuggers*, o ST-LINK/V2, análogo ao sistema incorporado nas suas placas de desenvolvimento que possuem interfaces STLink.

São então apresentadas três famílias STM32 dos processadores ARM Cortex M de 32 bits baseados numa arquitetura RISC. Ao contrário da arquitetura *Complex Instruction Set Computer* (CISC) presente nos processadores x86 da Intel ou AMD nos computadores convencionais, a RISC utiliza um conjunto simples e reduzido de instruções para processamento de dados. No entanto esta *Instruction Set Architecture* (ISA) requer maior dependência da memória RAM (no caso SRAM) com o intuito de originar um software mais eficiente dado a presença típica de menos transístores no hardware que a constitui [31].

A família *STM32 Ultra Low Power MCUs* destaca-se pelos seus consumos energéticos consideravelmente baixo mantendo um equilíbrio entre desempenho e potencia. O STM32L475RG é microcontrolador ARM Cortex-M4 e cumpre os requisitos estipulados. Alguns dos seus dados podem ser encontrados na tabela 5.5.

A família *Mainstream* otimizada para diversas aplicações industriais, apresenta uma variedade de microcontroladores com alto desempenho e baixo consumo energético associado. O STM32F103RB é microcontrolador ARM Cortex-M4 e cumpre todos os requisitos estipulados. Como meio de comparação com o modelo anteriormente apresentado, a tabela 5.5 reúne as suas principais características.

Por fim, a família *High Performance*, reúne os melhores microcontroladores para execução de código, transferência de dados e respetivo processamento. Isto aliado de aliado de uma gama maior de densidade de memória e periféricos avançados. O STM32F446RE é microcontrolador ARM Cortex-M4 e cumpre os requisitos estipulados. Assim como os anteriores, na tabela 5.5 são apresentadas as suas principais características.

Tabela 5.5: Comparaçāo de Microcontroladores STM32

Parāmetro	L475RGTx	F103RBTx	F446RETx
Freq. (MHz)	80	72	180
IO (Qt.)	51	51	50
Flash (kBytes)	1024	128	512
RAM (kBytes)	128	20	128
Package	LQFP64	LQFP64	LQFP64
Custo²(€)	4.50	2.63	3.90
Consumption³(mA)	11.64	50	110

5.3 Descrição de *Hardware*

O sistema de deteção de obstáculos através de um conjunto de sensores LiDAR organiza-se conforme o diagrama de blocos apresentado no capítulo 5.1.2 onde é apresentada a proposta de projeto. Para efeitos de desenvolvimento de um circuito capaz de integrar todos os pressupostos enunciados será necessário avaliar cuidadosamente cada bloco.

Neste subcapítulo procura-se clarificar todo estudo e desenvolvimento efetuado no âmbito do *hardware*, capaz de cumprir as boas práticas *Electromagnetic compatibility* (EMC) e simplificar a sua implementação em aplicações futuras.

O sistema em causa deve atuar como um nó na rede CAN existente, tendo no entanto uma função de *master* no que diz respeito à gestão interna das

⁴Análise feita na aplicação CubeIDE

⁵Máximo consumo de corrente em run mode com processamento de dados da Flash a 85 °C

leituras efetuadas pelos sensores LiDAR. Este circuito deve ser independente do módulo previamente desenvolvido, pelo que será efetuado um estudo para a implementação de uma interface de comunicação com o computador de bordo do drone e regulação do nível de tensão para alimentação dos componentes internos presentes na placa.

5.3.1 Esquema Elétrico

Todo a parte elétrica foi desenhada com recurso ao *software* Altium Designer tendo por base todas as construções parciais do circuito final, os esquemas provenientes da placa de desenvolvimento NUCLEO-F103RB e o projeto anteriormente desenvolvido.

Para esse efeito, o projeto final foi dividido em três esquemas essenciais. São eles os “MCU_F103RB” (Anexo A, Figura A.1), “*Source*” (Anexo A, Figura A.2), “*Communication Interfaces*” (Anexo A, Figura A.3). Adicionalmente, todos os componentes necessários à montagem da placa podem ser encontrados no capítulo 5.4 - Análise Financeira.

Microcontrolador

Conforme referido MCU selecionado deve possuir pelo menos uma interface de comunicação CAN, duas interfaces USART e uma interface I^2C . Em adição este tem de possuir a capacidade de realizar *Serial Wire Debug* (SWD) e possuir alguns *General Purpose Input Output* nos restantes pinos. Pelos factos anteriormente referidos, o microcontrolador escolhido para o dispositivo de controlo principal foi o STM32F103RBT6, conforme a Figura 5.7. Além de respeitar dos os requisitos necessários, apresenta as seguintes características:

- Cortex-M3 CPU Core de 32 bits;
- Frequência máxima de operação de 72 MHz;

- Oscilador interno de 8 MHz;
- Tensão operacional de 2.0 a 3.6 V;
- Encapsulado numa estrutura LQFP64 com 51 GPIOs;
- Até 3 Comunicações USART/UART, 2 comunicações SPI e I^2C e 1 comunicação USB e CAN ;
- 3 *General-purpose timers* e 1 *Advanced-control timer*;
- 128 kB de memória Flash;
- 20 kB de memória SRAM.

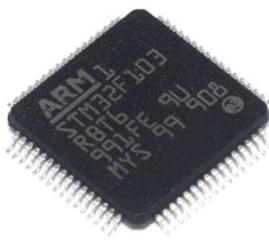


Figura 5.7: STM32F103RBT6

Para efeitos de programação e *debug* será necessário ter acesso a um conector o *Serial Wire Debug* (SWD) ou *Joint Test Action Group* (JTAG), para que este processo seja conseguido com um STLINK/V2-1 ou através de uma placa de desenvolvimento de microcontroladores STM32 (*e.g.*, Discovery, Nucleo).

O protocolo *Serial Wire - Debug Port* (SW-DP) é uma alternativa elétrica de 2 sinais (SWCLK e SWDIO) à interface *Joint Test Action Group - Debug Port* (JTAG-DP) de 4 sinais (JTCK, JTMS, JTDO, JTDI) e um último

de reset (JTRST) para aceder aos registos do microcontrolador e realização de *debugging*. De notar que o STM32F103RBT6 integra as duas interfaces para realização de *debug*, através de uma interface SWJ-DP (combinação das duas) capaz de detetar qual protocolo se encontra em execução por meio de uma sequência entregue ao pino JTMS/ SWDIO [32].

Círcuito dos sensores TFMini-Plus

Alternativamente ao desenvolvido anteriormente, adotou-se por uma estabelecer a possibilidade de comunicar com até 8 sensores TFMini-Plus através de um barramento I^2C . Tal como o protocolo USART, o I^2C apenas utiliza dois canais para estabelecer uma comunicação bidirecional. No entanto, comparativamente ao USART, possui hardware menos complexo.

Conforme exige o protocolo, para definição dos *idle state*, após uma *STOP condition*, nas linhas SDA e SCL é estabelecido uma resistência de *pull-up* aos 3,3V. O resultado pode ser observado no esquema da Figura 5.8.

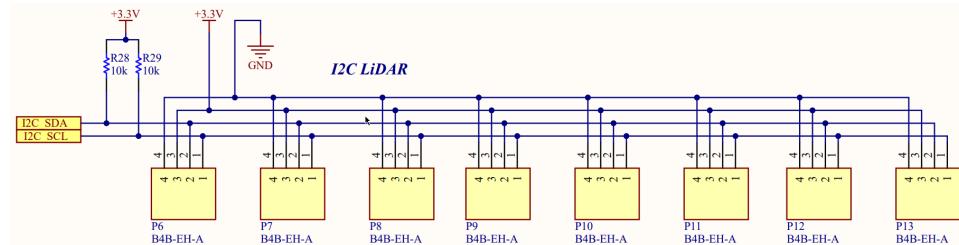


Figura 5.8: Interfaces de comunicação I^2C

Módulos de Comunicação CAN

Para a comunicação CAN é mantido o mesmo sistema previamente desenvolvido. Isto é, o transceiver TJA1051 efetua a tradução do microcontrolador para os *standards* elétricos do protocolo CAN.

Este barramento de comunicação série, desenvolvido para operar em ambientes adversos, exige a implementação de uma resistência de terminação

entre as linhas de sinal CAN *High* (CANH) e CAN *Low* (CANL), nos dois extremos da comunicação.

O esquema presente na Figura 5.9 segue a dita montagem. A sua alimentação deve ser feita recorrendo aos planos de 5 V e GND. A R18 permite ativar a resistência de terminação nos nós que assim o exijam. Por sua vez, os conectores P17 e P18 fazem a ligação do nó anterior do barramento CAN ao nó seguinte, transmitindo adicionalmente a alimentação regulada de 12 V.

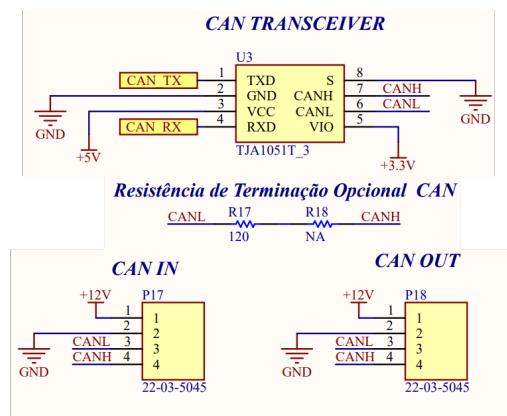


Figura 5.9: Esquema de ligação do *transceiver CAN*

Módulos de Comunicação RS-485

A interligação das duas placas através de um simples cabo sem qualquer tipo de blindagem segundo uma comunicação série pode-se ver comprometida, uma vez que se encontra sujeita a perturbações electromagnéticas potencialmente existentes no ambiente de operação.

Por este motivo manteve-se a implementação de um módulo de comunicação RS-485 que perante a correta configuração da série de resistências R22 a R25 permite realizar uma troca de dados robusta com o computador

de bordo do drone através do conector P16.

A solda da R24 e R25 implementa uma comunicação série USART diretamente para o terminal P16. Por sua vez, a solda da R22 e R23 implica a não montagem das anteriores resistências para uma ligação através do protocolo RS-485.

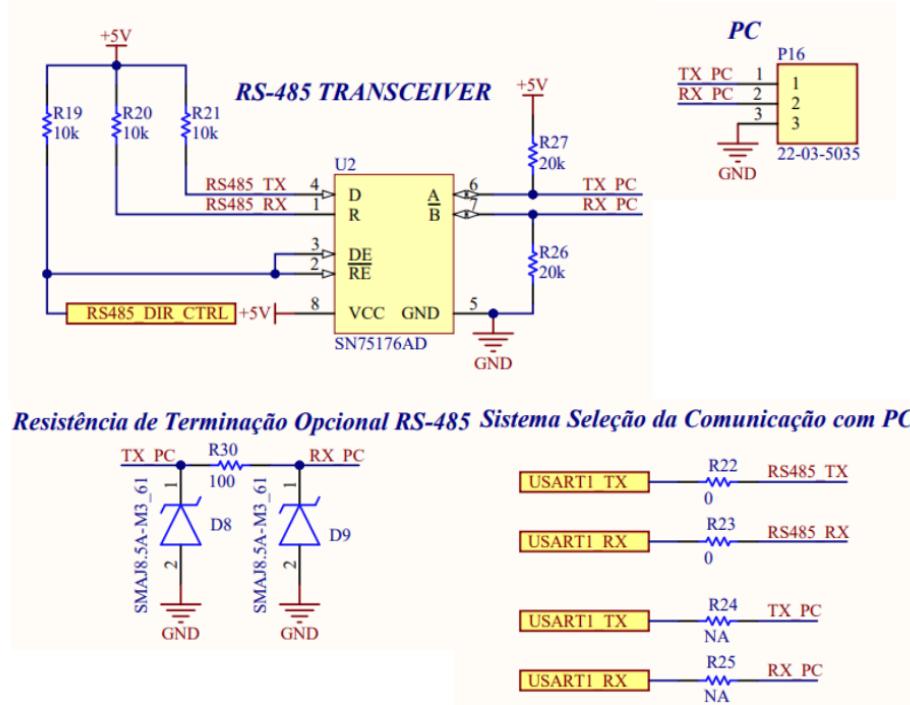
A Texas Instruments deixa bem claro qual deve ser a correta implementação do seu *transceiver*. A montagem é relativamente simples, passando pela colocação de proteções nas saídas e configuração das entradas. O esquema presente na Figura 5.10 segue a dita montagem. A sua alimentação deve ser feita recorrendo aos planos de 3,3 V e GND com pelo menos 2 vias, levando à redução do efeito indutivo na circulação de corrente.

Por sua vez, as resistências de *pull-up* nas entradas DE, RE permitem ativar o driver interno para transmissão de dados (ficando a receção coordenada pelo pino do microcontrolador com a *label* RS485_DIR_CTRL). Por outro lado as resistências de *pull-up* nas entradas D e R limitam as correntes de ruído que possam ocorrer durante eventos transitórios nestas linhas.

No lado da saída, a terminação do circuito com uma resistência de 100 Ω é aconselhada pelos motivos anteriormente referidos. Como recurso de proteção contra excessos de tensão temporários, a adição de um *Transient Voltage Suppressor* (TVS) bipolar entre cada via e a massa deve ser efetuada.

O TVS selecionado foi o SMAJ8CA uma vez que este apresenta uma *clamping voltage* máxima de 13,6 V (criando uma margem para a tensão de *ripple* existente no circuito de desacoplamento dos condensadores da alimentação). De notar que o efeito capacitivo do TVS, para velocidades de transmissão elevadas, pode perturbar a integridade da comunicação.

Por fim, as resistências de *pull-up* e *pull-down* nas vias das saídas são essenciais para definir o seu estado caso nenhum sinal seja transmitido ou ocorra desconexão das mesmas.

Figura 5.10: Esquema de ligação do *transceiver* RS-485

Filtragem e conversão de Tensão

Para o circuito eléctrico vão ser necessárias duas conversões. Sendo considerado o acesso a uma fonte regulada de 12 V a bordo do UAV, esta deve ser convertida para 5 V e 3,3 V. Para esse efeito é necessário implementar um sistema para cada tensão nominal capaz de obter a tensão desejada partindo da fonte de 12 V juntamente de componentes que proporcionem uma boa filtragem e cumpram as boas práticas para manter a *Electromagnetic Compatibility* (EMC).

Antes de dimensionar os componentes é essencial realizar uma análise teórica acerca da corrente máxima que o circuito pode exigir. Tendo em conta as duas tensões utilizadas, o consumo máximo é apresentado nas Tabelas 5.6 e 5.7.

Tabela 5.6: Consumo de Corrente dos Componentes alimentados a 3,3 V

Componente	Consumo Máximo
STM32F103RB	150 mA
Outros	≈ 0 mA
Total	≈ 150 mA

Tabela 5.7: Consumo de Corrente dos Componentes alimentados a 5 V

Componente	Consumo Máximo
8 x TFmini Plus	1120 mA
TJA1051T	70 mA
SN75176AD	60 mA
Outros	≈ 0 mA
Total	≈ 1.25 A

A adoção por um circuito capaz de fazer regulação da tensão de entrada através de acoplagem não isolada apresenta significativas vantagens no projeto em causa, uma vez que o seu tamanho reduzido e eficiência superior permitem a operação mais perto da carga, levando à redução dos campos magnéticos potencialmente desenvolvidos pelas linhas de transmissão. Além disso, a não existência de uma barreira de isolamento permite que a saída seja diretamente detetada e rigidamente controlada. Podemos encontrar dois tipos de reguladores não isolados, *linear regulators* e *switching regulators*. A Tabela 5.8 apresenta um comparativo entre os dois.

Apesar da maior contribuição de *Electromagnetic Interference* (EMI) por parte do *switching regulator*, a sua eficiência na conversão para uma tensão é predominante.

Tabela 5.8: *Linear regulator vs Switching Regulator*

Linear regulator	Switching Regulator
Círculo simples	Círculo complexo
Eficiência inferior	Eficiência superior
Dissipação do excesso de energia	Armazenamento do excesso de energia temporariamente
Maior dissipação de calor	Menor dissipação de calor
Pouco ruído eletromagnético	Maior ruído eletromagnético
Tamanho inferior	Tamanho superior
Modos de operação: <i>Buck</i>	Modos de operação: <i>Buck, Boost, Inverting</i>
Transístores operam na zona ativa	Transístores operam na zona saturação / corte (PWM)

Para a conversão de 5V foi escolhido o regulador V7805-1500, com as seguintes características:

- Baseado na topologia de comutação *buck* de frequência fixa;
- Corrente de saída até 1,5 A com proteção contra curto-circuito da mesma;
- Tensão de entrada de 6,5 a 18 V origina uma tensão regulada de 5 V na saída;
- Frequência de comutação de 340 kHz;
- Eficiência extremamente alta até 91 %, com tensão de ripple de 45 mV_{pp} .

Já na conversão para 3,3V é utilizado o regulador VX7803-500, com as seguintes características:

- Baseado na topologia de comutação *buck* de frequência fixa;
- Corrente de saída até 500 mA com proteção contra curto-circuito da mesma;
- Tensão de entrada de 4.75 a 36 V origina uma tensão regulada de 3,3 V na saída;

- Frequência de comutação de 700 kHz;
- Eficiência extremamente alta até 86 %, com tensão de *ripple* de 75 mV_{pp} .

Adicionalmente com o intuito de reduzir as flutuações de tensão presentes na tensão CC aplicada ao regulador é implementado um filtro em modo diferencial (*i.e.,* π -filter). O fornecedor disponibiliza uma listagem de valores típicos a implementar nestas posições que permitem a redução das emissões conduzidas e radiadas.

Na implementação em causa o controlo da tensão pressupõe a supressão da passagem de corrente na ocorrência de sobretensão quer seja continuamente quer seja por instantes breves. É sabido que a resposta a uma transição de estado não é completamente linear, podendo ocorrer *overshoot* de elevada tensão que podem danificar a eletrónica dos componentes presentes no circuito. Por esse motivo e seguindo a lógica do capítulo anterior, com recurso de um TVS SMAJ8CA entre a linha sujeita a essa tensão e a massa podemos limitar momentaneamente o valor do *overshoot* a 13,6 V dissipando o excesso de potência na forma de calor sem risco de danificar o circuito.

O diodo BYS10-25-E3 também será colocado em série com a entrada após um circuito de proteção de polaridade através de um MOSFET. Neste circuito de proteção conseguimos então garantir proteção contra o efeito transitório da tensão na entrada (ou excesso desta) e contra a aplicação de tensão inversa.

O uso de um circuito de proteção contra a aplicação de tensão inversa com recurso a um MOSFET de canal P a operar na saturação ou ao corte apresenta maior eficiência face à simples implementação de um diodo Schottky em série com o condutor positivo. O valor de RDS_{on} deve ser o mais baixo possível para dissipação de baixa potência. A corrente que circula no dreno deve aguentar a alimentação dos circuitos associados, pelo

que o I_D mínimo deve ser de 1,5 A para o conversor de 5 V e 500 mA para o conversor de 3,3 V. Por sua vez, o MOSFET deve aguentar uma tensão V_{DS} de 12 V. Por fim, um circuito constituído por um diodo zener e uma resistência de polarização foi aplicado entre os terminais da massa, *gate* e *source* para limitação da tensão nestes dois últimos terminais, caso o seu máximo seja atingido.

O MOSFET BSS215PH6327XT da Infineon apresenta uma tensão V_{DS} de 20 V e um corrente I_D de 1,5 A. Assim, o diodo zener de 6.8 V é suficiente para garantir que o circuito suporte uma tensão inversa de - 12 V.

Para finalizar o circuito de entrada é adicionado um fusível de 0,5 A, SF-0402S050M-2, para o circuito de 3,3 V e um fusível de 1,5 A, SF-0402S150M-2, para o de 5 V, capazes de isolar a fonte de alimentação dos restantes circuitos assim que esta corrente limite seja atingida.

O circuito presenta na Figura 5.11 pretende contemplar todos pontos mencionados neste subcapítulo.

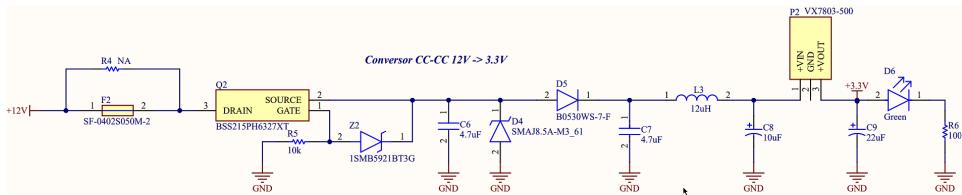


Figura 5.11: Esquema do circuito de alimentação

Circuito MCU STM32F103RBT6

No esquema que compõe as ligações ao STM32F103RBT6 fez-se uma filtragem do circuito inicial presente na placa de desenvolvimento associada.

O conector P14 foi adicionado para efeitos de programação do microcontrolador da placa em questão através de outro conector SWD presente no programador STLINK/V2-1 com uma interface SWJ-DP. Para esse efeito será necessário realizar os seguintes passos:

- Remover a resistência SB12 do programador para que seja efetuado corretamente o *reset* ao MCU a programar;
- Conectar os pinos 2, 3, 4, 5 e 6 do programador nos pinos da placa a programar, seguindo a mesma numeração;
- Remover os dois *jumpers* presentes no conector CN2 do programador;
- Alimentar a placa a programar composto pelo STM32F103RBT6;
- Efetuar a programação normal através do conector USB Mini-B compilando o programa num ficheiro binário e enviando-o para o disco virtual do programador.

Por sua vez o conector P4, de quatro pinos machos, permite aceder à USART2, para efeitos de *debug*, e aos pinos BOOT do MCU. De notar que os pinos BOOT0 e BOOT1 definem a forma de inicialização do microcontrolador, podendo executar código de regiões de memória diferentes [33]. Como tal, *switch* 2 permite fazer as seguintes comutações no pino BOOT0:

- **BOOT0 LOW** - permite a leitura e execução normal do código da memória;
- **BOOT0 HIGH** - permite o *upload* de um novo programa para a memória.

Através do conector P5 é possível aceder a todo o PORTC do microcontrolador se assim for necessário em implementações futuras. Já o conector permite fazer alguns testes de operação do circuito de alimentação, nomeadamente com a leitura dos valores de tensão 12 V, 5 V e 3,3 V.

O circuito de *reset*, composto pelo *switch* 1 apresenta um condensador de 100 nF capaz de reduzir a ocorrência de falsas interrupções de *reset* uma vez que suaviza a comutação de estado associada.

Os pinos de tensão analógica mantiveram a mesma configuração da placa de desenvolvimento, apesar de, no projeto em causa, não ser utilizados pe-

ríféricos com propriedades analógicas. Para tal conectou-se uma bobine indutora entre os pinos V_{DD} e o pino V_{DDA} . Esta bobine atuará como filtro ao ruído existente na corrente assim como na deteção de grandes variações desta.

Análogo ao efetuado no anteriores esquemas, foi adicionado um condensador de cerâmica de 100 nF, por cada pino V_{DD} do microcontrolador. Este facto contribui positivamente para a redução do efeito indutivo na circulação de corrente. Para consumos elevados de corrente pode ser necessário implementar um condensador de tântalo de 10 μF em paralelo. Ainda assim, para ruídos de elevada frequência pode ser adotado um condensador *bypass* de 10 nF , atuando em diferentes ramos do espetro das frequências.

De frisar que estes condensadores de desacoplamento ou *bypass*, quando devidamente posicionados e dimensionados atuam como um caminho de baixa impedância em direção à massa no momento de comutação de um sinal proveniente do circuito integrado (CI). Desta forma, no momento de redução ou aumento da tensão na entrada de um CI, um condensador de desacoplamento deve ser capaz de fornecer energia suficiente para manter essa tensão aos terminais do IC estável [34]. Ainda assim os condensadores devem:

- Ser colocados o mais próximo possível dos pinos de alimentação, para maior eficiência no seu efeito;
- Implementados em paralelo condensadores de diferentes valores, permitindo que uns forneçam melhor desacoplamento a altas frequências enquanto outros fornecem melhor desacoplamento a baixas frequências;
- Possuir baixo *Equivalent Series Resistor* (ESR) e *Equivalent Serie Inductance* (ESL).

Relativamente ao circuito oscilador de *clock* é possível enumerar várias soluções:

- Oscilador RC interno;
- Osciladores *Pierce* (cristal de quartzo e condensadores associados).

Umas vez que o oscilador à base de cristal de quartzo é mais preciso e estável que o oscilador interno, além de que o custo de implementação é relativamente baixo, será este o circuito oscilador adotado.

O circuito presenta no Anexo A, Figura A.1 contempla todos pontos mencionados neste subcapítulo.

5.3.2 Placa de Circuito Impresso

A criação de uma placa de circuito impresso (PCB) permite uniformizar o projeto desenvolvido, conseguindo realizar diversos testes com maior comodidade, sejam eles associados a adaptabilidades térmicas ou mecânicas.

O desenho da PCB é o passo seguinte e deve agregar todos os conceitos previa estipulados, juntamente com as recomendações disponibilizadas pelo fornecedor para a montagem de cada componente (e.g., posicionamento, largura das vias entre outros). No fluxo do desenho do esquema elétrico, a PCB foi desenvolvida com recurso ao *software* Altium Designer.

A disposição dos componentes da placa desenvolvida procurou manter a organização apresentada nos esquemas elétricos. Recorrendo à ferramenta *Room* do Altium Designer foi possível agrupar esses mesmos componentes e estipular para cada grupo as regras que os interligam.

Cuidados adicionais com largura de cada trace, distribuição de calor pela placa, potenciais atrasos nas linhas de comunicação e interferência entre estas também foram tidos em consideração.

As boas práticas na produção de uma PCB dizem que para o desenvolvimento de um projeto livre de EMI os componentes devem ser agrupados conforme a sua funcionalidade, tais como secções de circuitos analógicos, digitais, alimentação, baixa e alta velocidade. Após essa análise seguiu-se

a interligação dos vários componentes. Para isso foram definidas prioridades na disposição de traces. Sinais I^2C , *clock* e CAN foram diretamente conectados, evitando recorrer a vias ou passagem por zonas críticas.

Seguiu-se a ligação entre o MCU e os conectores SWD e *debug* uma vez que estes transportam informação a diferentes frequências.

O sistema de alimentação deve ser minuciosamente disposto e para esse efeito recorreu-se à informação disponibilizada pelo fornecedor no *datasheet* do conversor CC-CC e dos restantes componentes sempre que assim possível. Os condensadores do regulador devem ser colocados o mais próximo possível dos pinos do módulo, além disso deve-se ter em consideração que estes condensadores alimentam o circuito por meio de uma indutância diferente, pelo devem estar afastados uns dos outros de forma a reduzir a indutância mútua intrínseca da aproximação de duas bobinas.

Relativamente ao *transceiver* RS-485, este foi colocado junto ao conector que faz a ligação ao computador de bordo do drone. Já a resistência de terminação foi colocada o mais próximo possível na saída ou entrada dos módulos RS-485, o que representa um papel relevante, evitando a reflexão de parte do sinal na existência de condutores com diferente impedância. Associado a este efeito, está também a disposição dos traces. Estes foram desenhados evitando, sempre que possível, a ocorrência de ângulos retos.

Recorrendo à ferramenta *ActiveRoute*, do software em questão, juntamente com análise humana, procurou-se interligar os restantes componentes deixando para trás os *pads* de GND e alimentação (i.e., +12 V, +5 V, +3,3 V, entre outros).

Para uma correta distribuição de potência, desenvolvimento de um projeto livre de emissões eletromagnéticas e segundo uma implementação com razoável qualidade-preço optou-se pela criação de uma PCB com duas camadas separadas por um núcleo dielétrico de FR-4. Foi atribuída à camada inferior o potencial de GND e à superior os diferentes níveis de tensão.

Sinais de elevada frequência devem possuir *traces* curtos. Uma boa prática é a colocação destes sinais junto do plano de GND. Para tal a ferramenta *Via Shielding*, do Altium Designer facilita este processo, implementando vias, devidamente dispostas, ao plano de massa.

Recorrendo à ferramenta *Polygon Pour* foi possível reservar uma área considerável para cada um dos níveis de tensão. A adoção de vias nos *pads* permite reduzir o tamanho da PCB e otimizar a circulação de corrente nesta, desde que o diâmetro da via seja igual ou inferior ao tamanho do *pad*.

A largura necessária dos *traces* foi determinada com recurso à folha de dados PCB Trace Width [35], tendo apenas de ser introduzindo a corrente, a espessura do núcleo dielétrico e a variação de temperatura a que o *trace* é sujeito.

A placa desenvolvida pode ser encontrada no Anexo B, Figura B.1 no formato 2D, onde é possível observar as conexões entre componentes, ou na Figura 5.12 sobre renderização 3D.

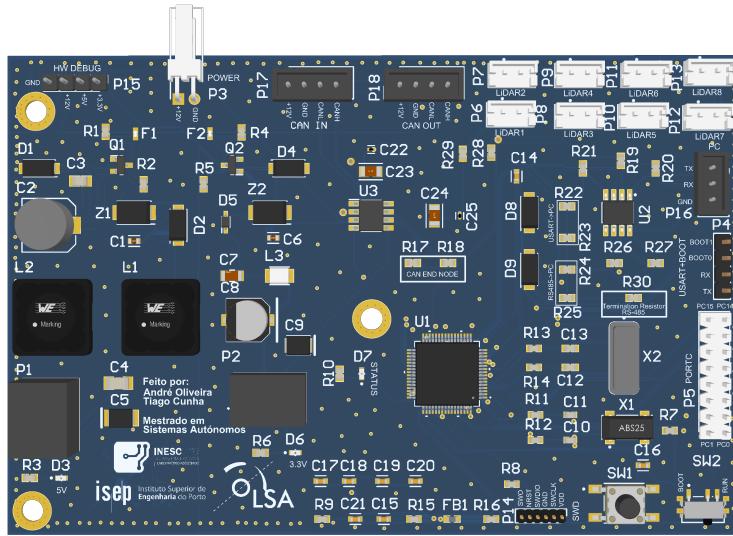


Figura 5.12: Esquema do circuito de alimentação

5.4 Descrição de *Análise Financeira*

O orçamento simplificado de todo o projeto é apresentado na Tabela 5.10. Na Tabela 5.9 é especificado o valor de cada componente utilizado para o desenvolvimento da PCB. O valores tabelados foram seleccionados com quantidades mínimas de 100 unidades a menos do microcontrolador. Os preços ilustrados não incluem os custos relacionados com a solda de componentes THT na placa.

Tabela 5.9: Possível orçamento dos componentes que constituem a PCB

Descrição	Quantidade	PU (€)	Total (€)
ABS25-32.768KHZ-6-T	1	0.772	0.772
Bobine 1 mH	2	0.043	0.086
Bobine 12 uH	1	0.052	0.052
Cristal 16 MHz	1	0.202	0.202
Condensador 4.7uF	3	0.11	0.33
Condensador 4.3pF	2	0.152	0.304
Condensador 20 pF	2	0.057	0.114
Condensador 100 nF	7	0.099	0.693
Condesenador 1 uF	2	0.103	0.206
Condensador 330uF	1	1.23	1.23
Condensador 0.1uF	2	0.844	1.688
Condensador 10uF	3	0.549	1.647
Condensador 2.2 uF	1	0.394	0.394
Condensador 22uF	2	0.295	0.59
Conversor V7805-1500	1	7.69	7.69
Conversor VX7803-500	1	4.03	4.03
Conector B2B-EH-A	8	0	0
Conector Macho 1*16	1	0.314	0.314
Conector Macho 1*4	2	0.0785	0.157
Conector 22/03/5045	2	0.156	0.312
Conector 22/03/5035	1	0.14	0.14
Conector 22/12/4022	1	0.33	0.33
Díodo Schottky BYS10-25-E3.TR	1	0.4	0.4
Díodo Schottky B0530WS-7-F	1	0.37	0.37
Ferrite 350 m	1	0.026	0.026
Resistência 0 Ohms	14	0.003	0.042
Resistência 100 Ohms	3	0.213	0.639
Resistência 120 Ohms	1	0.134	0.134
Resistência 220 Ohms	1	0.13	0.13
Resistência 10 kOhms	9	0.003	0.027
Resistência 20 kOhms	2	0.004	0.008
MOSFET BSS215PH6327XT	2	0.205	0.41
Díodo Zener 6,8 V	2	0.084	0.168
Fusível 1,5 A	1	0.72	0.72
Fusível 500 mA	1	0.72	0.72
Switch SPDT PCM12	1	0.57	0.57
Switch PCM12SMTR	1	0.1	0.1
STM32F103RBT6	1	5.06	5.06
SN75176AD	1	1.09	1.09
TJA1051T_3	1	0.884	0.884
TVS SMAJ8.5A	4	0.12	0.48
Total	58	-	33.259

Tabela 5.10: Possível orçamento da solução desenvolvida

Descrição	Total (€)
Componentes PCB	33.259
Assemblagem PCB	10.58
4 x TFmini Plus	174.64
Total	218.48

5.5 Descrição do Software

Tal como referido este módulo pode operar como *master* ou *slave* do barramento CAN.

No modo *slave* após a inicialização dos periféricos, são recolhidos os comandos enviados pelo barramento CAN, em seguida, consoante esta informação, é feita uma leitura sequencial dos LiDARs. Finalmente estes dados são processados, reorganizados e transmitidos pelo barramento CAN.

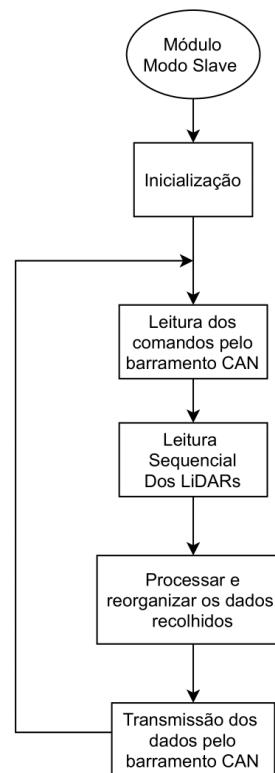


Figura 5.13: Fluxograma do módulo em modo *slave*

Já no modo *master*, após a inicialização dos periféricos, os LiDARs são sequencialmente lidos. Seguidamente estes dados são processados e reorganizados com os dados enviados pelos outros possíveis módulos, pelo barramento CAN. Por último, este congregado de dados, é devidamente reagrupado e enviado sequencialmente, sempre que exigido, para o computador de bordo do drone.

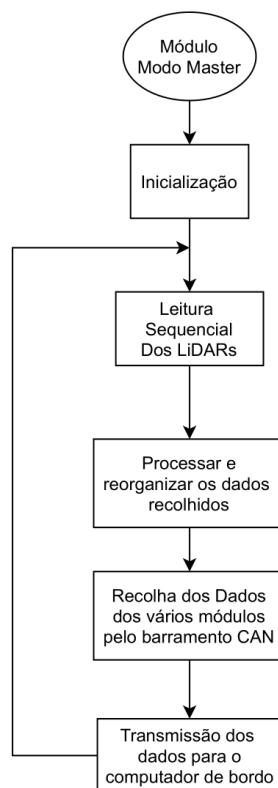


Figura 5.14: Fluxograma do módulo em modo Master

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Bibliografia

- [1] S. Brito. S. Brito, “Blog LabCisco: O Espectro Eletromagnético na Natureza,” 2013. <http://labcisco.blogspot.com/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html> (accessed Oct. 19, 2021).
- [2] “Vertical range of VLP-16. — Download Scientific Diagram.” <https://www.researchgate.net/figure/Vertical-range-of-VLP-16fig1332686285> (accessed Oct. 19, 2021). ”.
- [3] “Visimind Group.” https://visimind.com/offer_elodyne.php (accessed Oct. 19, 2021).
- [4] C. Dubois. C. Dubois, “What Is Solid State LiDAR and Is It Faster, Cheaper, Better?” 2018, Accessed: Oct. 23, 2021. [Online]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/news/solid-state-lidar-faster-cheaper-better/>.
- [5] “Teraranger Tower Evo — Solid State LiDAR System — Anti-Collision.” <https://www.terabee.com/shop/lidar-tof-range-finders/teraranger-tower-evo/> (accessed Oct. 25, 2021).
- [6] Terabee. Terabee, “Time-of-Flight principle: Technologies and advantages - Terabee.” <https://www.terabee.com/time-of-flight-principle/> (accessed Oct. 23, 2021).
- [7] “Lightweight LIDAR sensor - HPS-3D160 Pro - Hypersen Technologies Company - for obstacle detection / 3D / TOF.”

- <https://www.directindustry.com/prod/hypersen-technologies-company/product-234499-2357823.html> (accessed Dec. 08, 2021).
- [8] D. Daly. D. Daly, “A Not-So-Short History of Unmanned Aerial Vehicles (UAV),” 2020. Available: <https://consortiq.com/short-history-unmanned-aerial-vehicles-uavs/> (accessed Oct. 19, 2021).
- [9] Unmanned aerial vehicle, <https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned-aerial-vehicle>, (accessed: 19.10.2021).
- [10] Instituto Superior de Engenharia. LSA Projects.” <http://www.lsa.isep.ipp.pt/pages/lsa-projects.html> (accessed Oct. 21, 2021).
- [11] Z. A. Khan, “Obstacle Avoidance Methods in UAVs,” 2019. 2019.
- [12] G. Alejandro, “Iris Automation — Obstacle Avoidance Drones: How They Work and What To Know,” VP of Research Development at Iris Automation, 2020. <https://www.irisonboard.com/obstacle-avoidance-drones-how-they-work/> (accessed Oct. 22, 2021).
- [13] F. Corrigan, “12 Top Collision Avoidance Drones And Obstacle Detection Explained — DroneZon,” Dronezone, pp. 1–43, 2019, Accessed: Oct. 26, 2021. [Online]. Available: <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/top-drones-with-obstacle-detection-collision-avoidance-sensors-explained/>.
- [14] DJI, “Mavic 2 - DJI,” 2021. <https://www.dji.com/pt/mavic-2> (accessed Oct. 25, 2021)., 2021.
- [15] “Monocular Cues: Types and How They Help You See.” <https://www.healthline.com/health/all-about-monocular-cues-and-how-we-use-them> (accessed Oct. 27, 2021).

- [16] Y.Li and X.Q.A. Y. Li and X. Q. A, “Issue 1 — Article 1003 Survey of SLAM Research based on LiDAR Sensors,” 2019.
- [17] A. Moffatt, E. Platt, B. Mondragon, A. Kwok, D. Uryeu, and S. Bhandari, “Obstacle Detection and Avoidance System for Small UAVs using a LiDAR,” 2020 Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst. ICUAS 2020, pp. 633–640, 2020. pages 633–640, 2020.
- [18] Velodyne, “Velodyne LiDAR Puck,” Velodyne LiDAR, Inc., pp. 19, 2019, Accessed: Oct. 22, 2021. [Online]. Available: www.velodyneldar.com. 2019.
- [19] C. Watkins D. Wang and H. Xie. D. Wang, C. Watkins, and H. Xie, “MEMS mirrors for LiDAR: A review,” *Micromachines*, vol. 11, no. 5, 2020. *Micromachines*, 11, 2020.
- [20] “Controller-Hypersen Technologies Co., Ltd.” <https://en.hypersen.com/product/kzq.html.html> (accessed Oct. 26, 2021).
- [21] STMicroelectronics, “Time of Flight (ToF) Sensors - STMicroelectronics.” <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/time-of-flight-sensors.html> (accessed Dec. 05, 2021).
- [22] “Buy Time-of-Flight sensors - STMicroelectronics eStore.” <https://estore.st.com/en/products/imaging-and-photonics-solutions/time-of-flight-sensors.html> (accessed Dec. 05, 2021).
- [23] “Vl53L3Cx Vl53L3Cx,” Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l3cx.pdf>.
- [24] T. Vl, “VL53L1 New generation Time-of-Flight ranging sensor with advanced.”

- [25] D. S. P. A, “TFmini Plus LiDAR Module Technical Specifications and Parameters TFmini Plus LiDAR Module Datasheet SJ-PM-TFmini Plus A07,” pp. 3–5.
- [26] D. S. A, “TFmini-S LiDAR Module Technical Specifications and Parameters TFmini-S LiDAR Module,” pp. 2–4.
- [27] D. S. A, “TF-Luna LiDAR module Technical Specifications and Parameters TF-Luna LiDAR Module,” pp. 1–2.
- [28] HPS-3D160 Pro,” 2021 Available: <https://en.hypersen.com/include/upload/kind/file/20210>
- [29] LeddarTech, “Leddar Vu8,” 2019. Available: <https://www.hancommds.com/humanframe/theme/developers/assets/download/SpecSheetLeddar%20Vu8.pdf>.
- [30] J. Teel, “How to Select the Microcontroller for Your New Product,” Predictabledesigns. <https://www.electromaker.io/blog/article/how-to-select-the-microcontroller-for-your-new-product> (accessed 06.12.2021).
- [31] S. Thornton, “RISC vs. CISC Architectures: Which one is better?,” Microcontroller Tips, pp. 1–13, 2018.
- [32] “SWD – ARM’s alternative to JTAG – Kudelski Security Research.” [Online]. Available: <https://research.kudelskisecurity.com/2019/05/16/swd-arms-alternativeto-jtag/>. [Accessed: 6.12.2021].
- [33] “AN2606 Application Note STMicroelectronics”. Stm32 microcontroller system memory boot mode, 2007.
- [34] H. O. Consultants, Electromagnetic Compatibility Engineering. Canada, 2009.

- [35] “PCB Trace width Calculator” Available:
<https://circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator/> (accessed 07.12.2021).

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Apêndice A

Esquema Eléctrico do Sistema

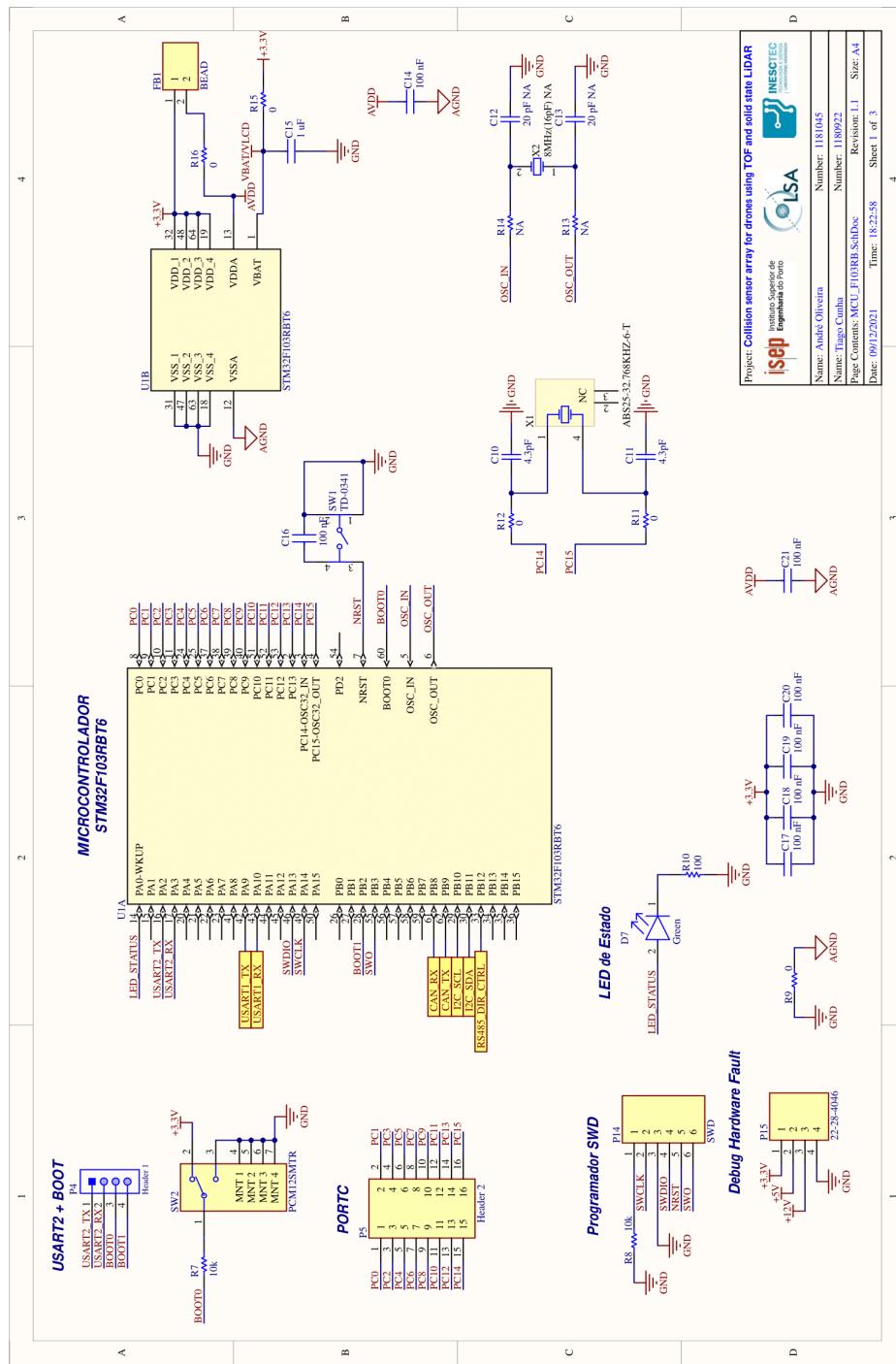


Figura A.1: Esquema das ligações ao MCU STM32F103RBT6.

Capítulo 1

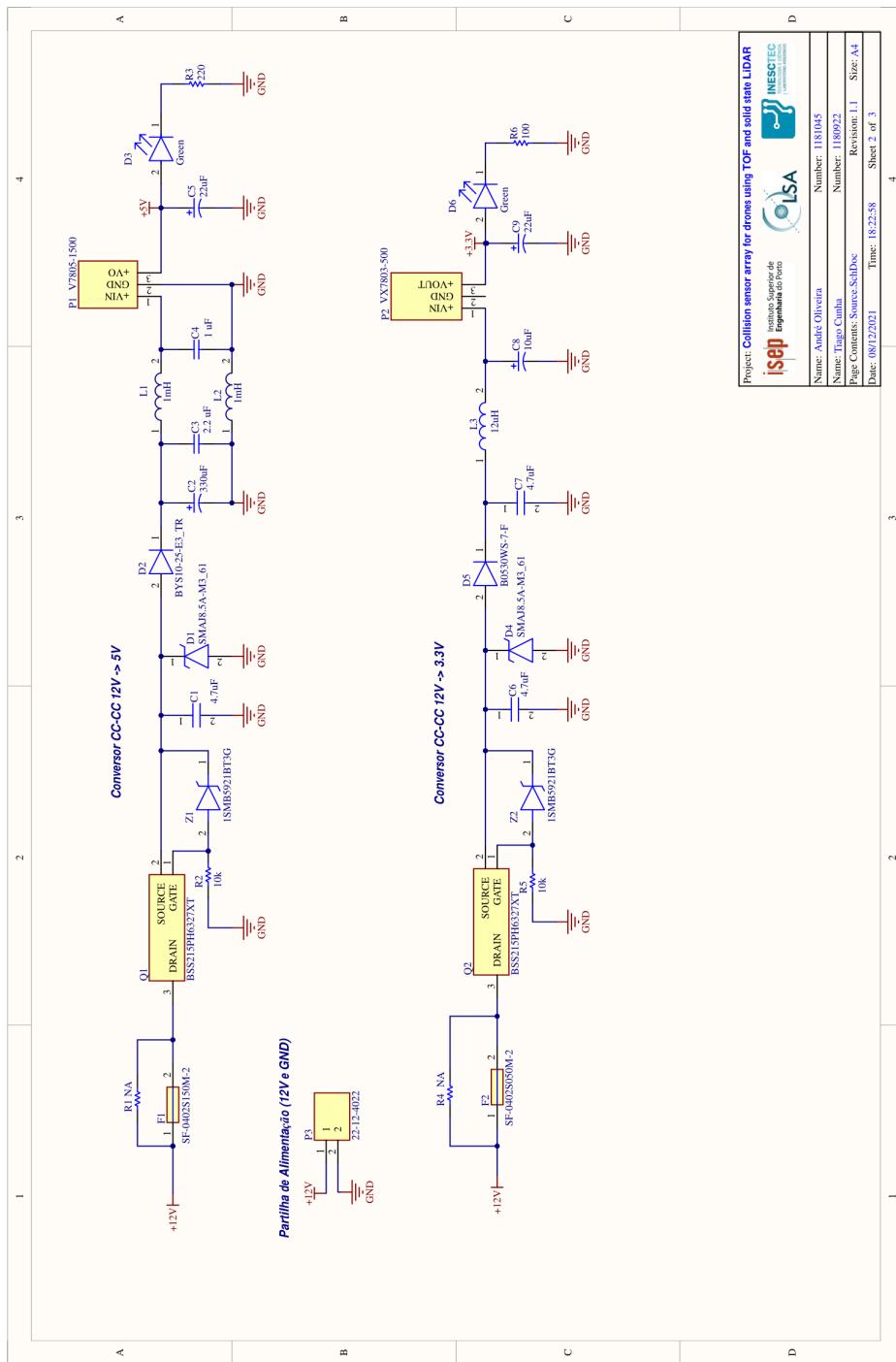


Figura A.2: Esquema de filtragem e conversão da tensão de entrada para as alimentações do circuito.

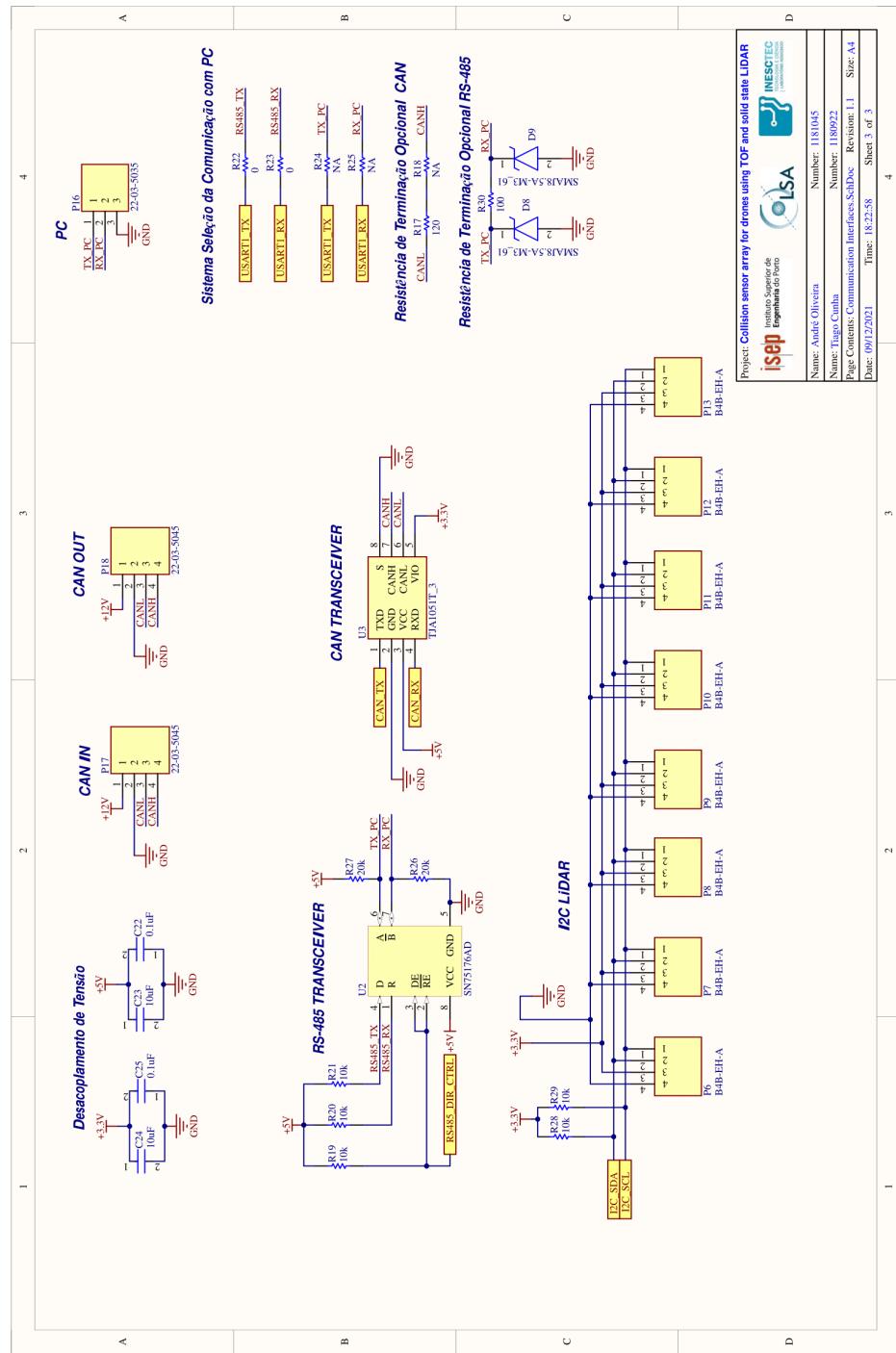


Figura A.3: Esquema dos circuitos que implementam as interfaces de comunicação RS-485, I2C, USART e CAN.

Apêndice B

Placa de Circuito Impresso Desenvolvida

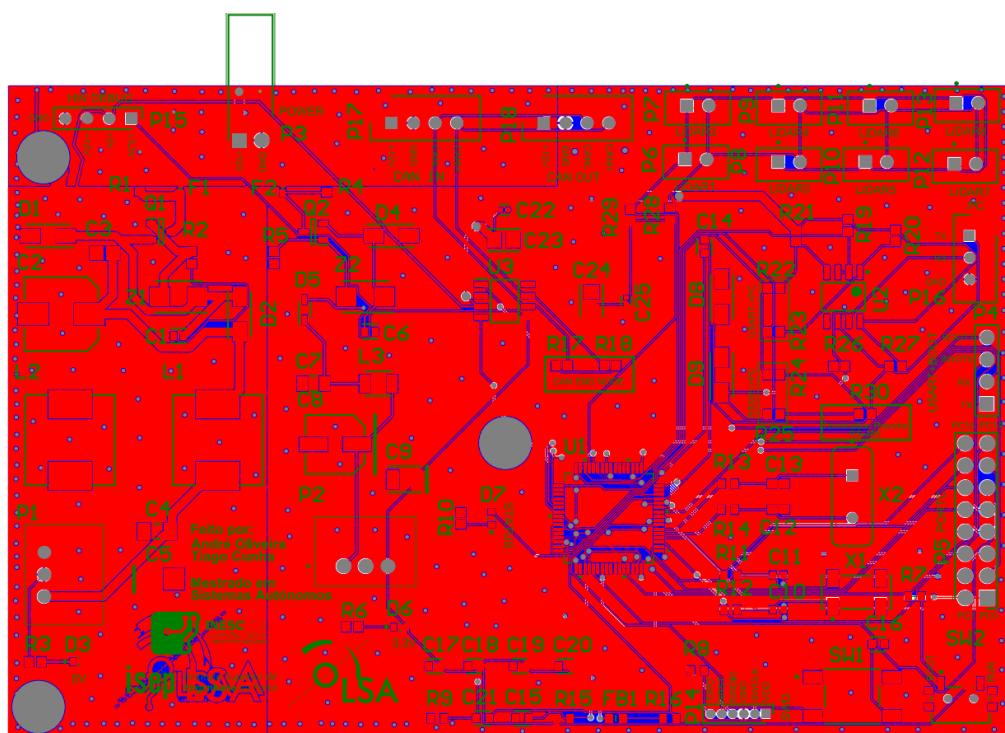


Figura B.1: PCB desenvolvida vista de uma camada superior.