

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRUNO BARATO**

**PROJETO DE UM SISTEMA DE  
CONTROLE PARA VEÍCULOS  
AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

São Carlos  
2014



**BRUNO BARATO**

# **PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PARA VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de  
Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com  
ênfase em eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Eduardo  
do Valle Simões

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B226p Barato, Bruno  
PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PARA VEÍCULOS  
AÉREOS NÃO TRIPULADOS / Bruno Barato; orientador  
Eduardo do Valle Simões. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. VANTs. 2. Controle de Navegação. 3. ArduPilot.  
4. Placa de Circuito Impresso. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Bruno Barato

Título: "Projeto de um sistema de controle para veículos aéreos não tripulados"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 25/06/2014,

com NOTA 9,5 (nove, cinco), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Dr. Eduardo do Valle Simões - (Orientador - SSC/ICMC/USP)*

*Profa. Dra. Sarita Mazzini Bruschi - (SSC/ICMC/USP)*

*Prof. Assistente Jerson Barbosa de Vargas - (SEL/EESC/USP)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel



*À minha irmã.*





## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, José Antônio e Vânia pela educação oferecida a mim e as orientações em minhas decisões.

Ao professor Eduardo do Valle Simões por ser um entusiasta com todo o trabalho que realiza, este demonstrando forte empolgação pelos desafios, o que reflete fortemente na motivação de seus estudantes.

Aos meus amigos que tive a oportunidade de conhecer e conviver, além de estarem presentes durante momentos inesquecíveis durante todos esses anos em que estudei em São Carlos, em especial a Brunno, Gustavo, William, Felipe, Fernando, Oswaldo e Telos, os quais tive a oportunidade de morar junto, o que nos fez criar um vínculo muito forte.



## RESUMO

BARATO, B. Projeto de um Sistema de Controle para Veículos Aéreos Não Tripulados. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014, São Carlos, SP, Brasil.

Este trabalho consiste do desenvolvimento do *hardware* de um sistema de controle de navegação para Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs). A nova placa a ser construída tem como base a plataforma para VANTs ArduPilot. Este é um projeto aberto desenvolvido por uma comunidade de aeromodelistas. As mudanças feitas serão a instalação de novos sensores, tais como giroscópio, acelerômetro, sensores de pressão diferencial, pressão barométrica e GPS, além da substituição de alguns desses sensores já existentes por outros mais modernos. Será projetada uma nova placa de circuito impresso para acomodar os novos componentes do sistema. O sistema de controle a ser desenvolvido é aberto e disponível a toda a comunidade USP.

**Palavras-chave:** VANTs, Controle de Navegação, ArduPilot, Placa de Circuito Impresso.



## ABSTRACT

BARATO, B. Project to a Control System to Unmanned Aerial Vehicles. (Senior Research Project) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, 2014, São Carlos, SP, Brazil.

This project consists in the developing of the hardware of a project to a control system to unmanned aerial vehicles with autonomous flight. The new board is based and will substitute the already in market UAV platform called ArduPilot. The changes done are the addition to new sensors such as gyroscope, accelerometers, differential pressure sensor and GPS. Moreover the changes of some sensors to more modern ones.

**Palavras-chave:** UAVs, Navigation Control, ArduPilot, Printed Circuit Board.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Balão Intrepid utilizado na guerra civil americana [1] .....   | 1  |
| Figura 2: Drone utilizado para entrega de medicamentos em áreas remotas [3].....   | 2  |
| Figura 3: Imagens registradas por um VANT em Fukushima, Japão após acidente nuclear em 2011 [6] .....  | 5  |
| Figura 4: Aeronave Ararinha – 11 de maio de 2013, Comando do Exército – Pirassununga, SP. ....   | 6  |
| Figura 5: Servomotor instalado em VANT [8] .....   | 7  |
| Figura 6: Ilustração do funcionamento de um servomotor [9].....  | 7  |
| Figura 7: Definição dos eixos e os movimentos de rotação de uma aeronave [10] .....  | 8  |
| Figura 8: Possível ligação dos motores Servo para controle do voo de um VANT [12] .  | 9  |
| Figura 9: Momento angular sofrido pela aeronave em influência da movimentação do aerilon, profundor e leme [11] .....  | 10 |
| Figura 10: Princípio de funcionamento de um giroscópio clássico [15] .....   | 12 |
| Figura 11: Exemplo de um giroscópio MEMS [16] .....  | 12 |
| Figura 12: Detalhes de um acelerômetro de três eixos e uma câmera acoplados na barbatana dorsal de um tubarão-tigre [18] .....   | 13 |
| Figura 13: Altímetro utilizado para saltos de paraquedas. Centro de paraquedismo, Boituva, SP.....   | 14 |
| Figura 14: Interpretação o sistema de rastreamento de um GPS [24].....   | 17 |
| Figura 15: Exemplo de um Acelerômetro MEMS [27].....   | 18 |
| Figura 16: Barramento I <sup>2</sup> C ligado a diversos dispositivos e um microcontrolador [29].  | 18 |
| Figura 17: Exemplo de como funciona a transferência de dados na comunicação I <sup>2</sup> C [28] .....  | 19 |
| Figura 18: Vias interligando as camadas de uma placa de circuito impresso de quatro camadas, estas camadas sendo representadas pelas cores: vermelho, amarelo, azul ciano e azul escuro [31] ..... | 20 |
| Figura 19: Gráfico da largura da trilha medido em milésimo de polegada (eixo y) pela corrente suportada pela trilha (eixo x) [30] .....  | 21 |
| Figura 20: ArduPilot Mega 1.5[35].....   | 22 |
| Figura 21: Projeto da placa de circuito impresso do ArduPilot 2.5 [38].....  | 24 |
| Figura 22: Tela inicial do software Mission Planner .....  | 25 |
| Figura 23: Microcontrolador Atmega2560 [40] .....  | 28 |
| Figura 24: Microcontrolador Atmega32U2 [42].....   | 29 |
| Figura 25: Sensor de Pressão Barométrica MS5611-01BA [43].....   | 29 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 26: Gráfico da saída ADC do MS5611-01BA x Pressão [43].....   | 30 |
| Figura 27: Pinos dos Multiplexador – TSA5A23157 [44] .....   | 30 |
| Figura 28: Conexão do pino COM de acordo com a tensão no pino IN [44].....   | 31 |
| Figura 29: Pinos da memória de dados AT45DB161D [45].....  | 32 |
| Figura 30: Sensor de pressão diferencial mpxv7002dp (Foto real e Esquemático) [46]<br>.....  | 33 |
| Figura 31: Layout do sensor de pressão diferencia MPXV7002dp para placa de circuito<br>impresso [46] .....                               | 33 |
| Figura 32: Gráfico de tensão de saída (eixo y) por pressão diferencial medida (eixo x)<br>[46] .....                                     | 34 |
| Figura 33: Terminais do GPS u-blox 6Q [47] .....   | 35 |
| Figura 34: Layout do GPS u-blox 6Q para placa de circuito impresso [47].....   | 37 |
| Figura 35: Pinagem do dispositivo MPU-9150 [48] .....  | 38 |
| Figura 36: Diagrama de blocos do MPU-9150 [48] .....   | 40 |
| Figura 37: Layout do Rastreador de movimento MPU-9150 para placa de circuito<br>impresso [48] .....                                      | 40 |
| Figura 38: Diagrama de contendo os componentes da nova placa do controlador que<br>será montado.....                                     | 42 |
| Figura 39: Circuito de alimentação da placa de circuito impresso .....   | 43 |
| Figura 40: Circuito para simulação da queda de tensão em D1 .....  | 44 |
| Figura 41: Resultado da simulação do circuito da figura 43 .....   | 45 |
| Figura 42: Diagrama da conexão feita entre os sensores MPU-9150 e MS5611 com o<br>microcontrolador .....                                 | 46 |
| Figura 43: Conexão dos terminais do sensor de pressão diferencial MPXV7002dp....   | 47 |
| Figura 44: <i>Schematic</i> das conexões do GPS u-blox 6Q.....   | 48 |
| Figura 45: Alimentação da placa de circuito impresso .....   | 49 |
| Figura 46: <i>footprint</i> e conexões entre o rastreador de movimento, sensor de pressão<br>barométrico e o <i>levelconverter</i> ..... | 50 |
| Figura 47: <i>footprint</i> e conexão entre o sensor de pressão diferencial e o<br>microcontrolador .....                                | 50 |
| Figura 48: <i>footprint</i> do GPS e da antena com as conexões para o microcontrolador ..  | 51 |



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Comparação entre os componentes existentes no ArduPilot 2.5 e os que serão utilizados na nova placa desenvolvida ..... | 27 |
| Tabela 2: Tabela da conexão do multiplexador TSA5A23157 [44].....  | 31 |
| Tabela 3: Terminais do Sensor de pressão mpxv7002dp [46].....  | 33 |
| Tabela 4 : Terminais do GPS u-blox 6Q [47].....  | 36 |
| Tabela 5: Dimensões do GPS u-blox 6Q [47] .....  | 37 |
| Tabela 6: Terminais do dispositivo MPU-9150 [48] .....   | 39 |
| Tabela 7: Medidas do dispositivo MPU-9150 [48] .....   | 41 |



## LISTA DE SIGLAS

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

IMU – Unidade de Medição Inercial

GPS – Sistema de Posicionamento Global

I<sup>2</sup>C – Circuito Inter Integrado

SCL – Linha de *Clock* Serial

SDA – Linha de Dados Serial

APM – AutoPilot Mega

IPC – *Institute for Printed Circuits*

EAGLE – *Easily Applicable Graphical Layout Editor*

RC – Rádio Controle

RISC – Computador com um Conjunto Reduzido de Instruções

ESC – *Eletronic Speed Control*

SPI – *Serial Peripheral Interface*



## LISTA DE SÍMBOLOS

$L$  – Momento angular

$I$  – Momento de Inércia

$\omega$  – Velocidade angular

$r$  – raio

$m$  – massa

$v$  – velocidade

$P_{\text{atm}}$  – Pressão atmosférica

$A$  – Altura

$v_{\text{air}}$  – velocidade do ar;

$P_i$  – pressão em cada uma das fontes do sensor de pressão diferencial;

$\rho$  – densidade;

$x, y, z$  – componentes de posição do GPS;

$\tilde{t}_r$  – tempo de recepção da mensagem;

$b$  – tempo de atraso do sinal de *clock*;

$c$  – velocidade da luz;

$p_i$  – distância entre o GPS e o satélite indicado.



# SUMÁRIO

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                              | <b>1</b>  |
| 1.1       | MOTIVAÇÃO .....                                      | 1         |
| 1.2       | OBJETIVO .....                                       | 2         |
| 1.3       | ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA .....                      | 3         |
| <b>2.</b> | <b>REVISÃO TEÓRICA.....</b>                          | <b>5</b>  |
| 2.1       | VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANTS) .....         | 5         |
| 2.2       | SERVOMOTOR .....                                     | 6         |
| 2.3       | ESTABILIDADE E CONTROLE DE VOO DE UMA AERONAVE ..... | 8         |
| 2.3       | UNIDADE DE MEDIDA INERCIAL .....                     | 10        |
| 2.4       | SENSORES.....  | 11        |
| 2.4.1     | Giroscópio.....                                      | 11        |
| 2.4.2     | Acelerômetro .....                                   | 12        |
| 2.4.3     | Magnetômetro .....                                   | 13        |
| 2.4.4     | Sensor de Pressão .....                              | 14        |
| 2.4.5     | Sensor de Pressão Diferencial .....                  | 15        |
| 2.4.6     | GPS.....   | 15        |
| 2.5       | SISTEMAS MICROELETROME CÂNICOS.....                  | 17        |
| 2.6       | BARRAMENTO I <sup>2</sup> C .....                    | 18        |
| 2.7       | PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO.....                      | 19        |
| 2.8       | ARDUPILOT .....                                      | 22        |
| 2.9       | MISSION PLANNER .....                                | 24        |
| <b>3.</b> | <b>DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....</b>              | <b>27</b> |
| 3.1       | DISPOSITIVOS EM COMUM COM O ARDUPILOT 2.5 .....      | 27        |
| 3.1.1     | Microcontrolador ATmega2560 .....                    | 28        |
| 3.1.2     | Microcontrolador Atmega32U2.....                     | 28        |
| 3.1.3     | Sensor de Pressão – MS5611-01BA .....                | 29        |
| 3.1.4     | Multiplexador – TS5A23157.....                       | 30        |
| 3.1.5     | Memória de dados – AT45DB161D .....                  | 31        |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2   | SENSORES QUE SERÃO ADICIONADOS AO CIRCUITO IMPRESSO DO PROJETO DE CONTROLE ..... | 32 |
| 3.2.1 | Sensor de Pressão Diferencial – MPXV7002dp .....                                 | 32 |
| 3.2.2 | GPS - u-blox 6Q - série NEO-6 .....  | 34 |
| 3.2.3 | Rastreador de movimento – MPU-9150 .....   | 38 |
| 3.3   | DIAGRAMA DE BLOCOS DA NOVA PLACA QUE SERÁ DESENVOLVIDA.....                      | 41 |
| 3.4   | CONEXÃO DOS COMPONENTES.....   | 43 |
| 3.4.1 | Alimentação .....  | 43 |
| 3.4.2 | MPU-9150 e sensor de pressão barométrico MS5611 .....                            | 45 |
| 3.4.3 | Sensor de pressão diferencial MPXV7002dp .....                                   | 47 |
| 3.4.4 | GPS u-blox 6Q.....   | 48 |
| 4.    | RESULTADOS .....   | 49 |
| 5.    | CONCLUSÃO .....  | 53 |
| 5.1   | TRABALHOS FUTUROS .....  | 53 |
|       | BIBLIOGRAFIA .....   | 55 |
|       | APÊNDICE A – SCHEMATIC DO PROJETO DESENVOLVIDO .....                             | 59 |
|       | APÊNDICE B – PLACA DO PROJETO DESENVOLVIDO .....                                 | 65 |
|       | APÊNDICE C –DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS DA PLACA DESENVOLVIDA .....                 | 67 |



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

A ideia de pilotar aeronaves não tripuladas não é um conceito novo. Uma das primeiras datas registradas do uso de drones foi pelos austríacos em 22 de agosto de 1849. Nessa data foram lançados cerca de 200 balões que ao invés de serem pilotados, haviam apenas bombas acopladas a eles e estes foram lançados em direção à cidade de Veneza e em menos de duas décadas depois o qual o balão Intrepid foi utilizado na guerra civil americana, como apresentado na Figura 1, a mesma técnica foi utilizada na guerra civil americana, no ano de 1862[1].

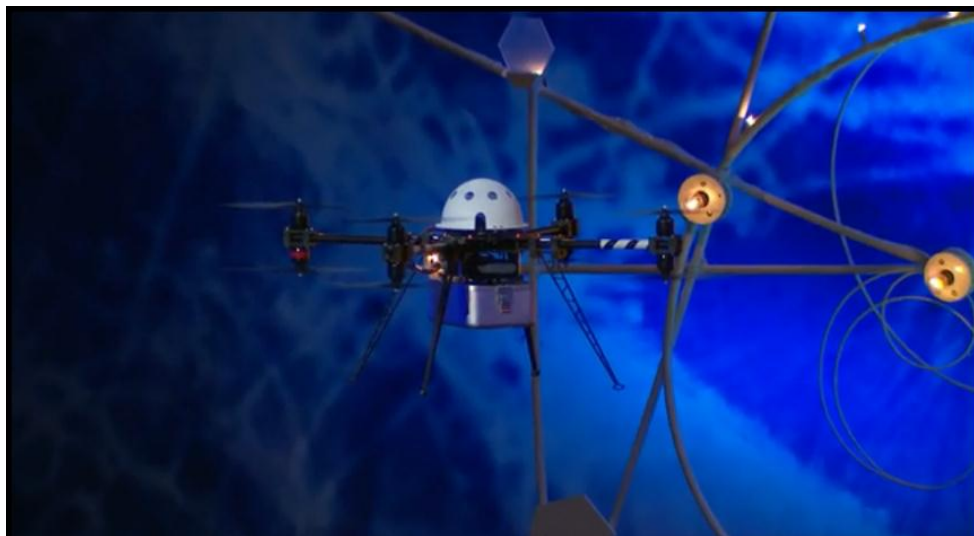


**Figura 1: Balão Intrepid utilizado na guerra civil americana [1]**

Além dos usos militares, para os quais inicialmente foram desenvolvidos, os VANTs (veículos aéreos não tripulados), também referenciados como UAV (do inglês *Unmanned Aerial Vehicle*), têm o seu uso civil em abundante crescimento. Essas aplicações incluem filmagem de locais de difícil acesso, inspeção de linhas de transmissão, monitoramento do comportamento de animais em seu habitat natural, entrega de medicamentos em áreas de acesso remoto e entretenimento, entre outros inúmeros usos[2].

Com a crescente popularização dos VANTs e as múltiplas funcionalidades exercidas por estes, o sistema de controle embarcado precisa ser cada vez mais aperfeiçoado, de modo a aumentar a sua eficiência e concluir com mais segurança a

missão a que foi designado. A Figura 2 exemplifica um drone moderno utilizado na entrega de medicamentos no continente africano.



**Figura 2: Drone utilizado para entrega de medicamentos em áreas remotas [3]**

O estudo realizado nesse trabalho visa aperfeiçoar o hardware do já atual sistema de controle para veículos aéreos não tripulados, Ardupilot[4] e servir de conexão para futuros aperfeiçoamentos e desenvolvimentos nessa área. Além disso, com o desenvolvimento dessa nova placa de controle para as aeronaves Ararinha e Mamangava, desenvolvidas no Laboratório de Computação Reconfigurável do ICMC-USP, os pesquisadores e alunos desta Universidade poderão dispor de sistemas aéreos robóticos desenvolvidos e construídos nacionalmente.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento do *hardware* de um sistema de controle de navegação para VANTs, que deverá substituir o controlador atual utilizado por diversos pesquisadores e aeromodelistas, chamado ArduPilot. Este é um sistema aberto baseado na plataforma Arduino[4], também aberta. Esta tecnologia visa que se implemente futuras modificações no controlador de voo. Modificações estas que são imprevisíveis no decorrer da atuação do sistema de controle.

Para o novo sistema de controle a ser desenvolvido, vários sensores serão substituídos por versões mais atuais. Estes sensores são um giroscópio com sensor inercial integrando compasso eletrônico e acelerômetros e sensor de pressão barométrica. Serão acrescentados na placa um sensor de pressão diferencial (para medir a velocidade da aeronave em relação ao ar) e um GPS (Sistema de Posicionamento

Global) integrado. Essas modificações visam reduzir custos e integrar em uma única placa de reduzidas dimensões todos os sensores necessários para o controle de navegação das aeronaves. Será projetada uma nova placa de circuito impresso para acomodar os novos componentes do sistema. O sistema de controle a ser desenvolvido será aberto e disponível a toda a comunidade USP.

### **1.3 Organização da Monografia**

O trabalho está dividido em cinco capítulos, os quais estão estruturados da seguinte maneira:

1. Introdução: Apresenta como o projeto está estruturado, bem como projetos utilizados como motivação e os objetivos do trabalho.
2. Revisão Teórica: Apresenta uma breve revisão teórica sobre os principais assuntos abordados durante o projeto. Destes podem ser citados a aeronave que será controlada posteriormente e como ela é estabilizada no voo, o funcionamento dos sensores e por final uma apresentação ao ArduPilot.
3. Desenvolvimento do Projeto: Descreve os sensores utilizados nesse projeto e como eles foram conectados para a montagem final da placa.
4. Resultados: Apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento do projeto.
5. Conclusão: Apresenta as conclusões obtidas e os trabalhos futuros a serem desenvolvidos para melhoria deste projeto.



## 2. REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo tem o intuito de familiarizar e contextualizar o leitor sobre os principais assuntos tratados neste trabalho por meio de uma breve revisão teórica.

### 2.1 Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)

Os VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) são aeronaves que possuem a capacidade de sustentar voo sem a presença de uma pessoa a bordo. Seu voo é controlado autonomamente por microcontroladores instalados diretamente no veículo, com o auxílio de sensores que permitam o controle do voo da aeronave, calculando, por exemplo, a sua trajetória e as condições ambientais que as cercam. Dentre esses sensores, estão inclusos GPS (Sistema de Posicionamento Global), Giroscópio, sensores de pressão, entre outros específicos para uma determinada aplicação, de modo que o VANTs possa realizar a missão a qual foi projetado.

Apesar desses veículos terem seu uso primário em aplicações militares, eles têm sido utilizados em diversas novas áreas de atuação, por exemplo, agricultura, segurança, detecção de focos de incêndio, localização e resgate de pessoas e exploração de áreas de risco. Dessa maneira, pode ser realizada a captação de imagens, som ou medição de radioatividade do local desejado sem colocar em risco a vida de pessoas envolvidas no processo, como na Figura 3 a qual foi registrada a partir de um VANT sobrevoando Fukushima, e com um custo relativamente baixo para determinada missão a ser cumprida [5].



**Figura 3: Imagens registradas por um VANT em Fukushima, Japão após acidente nuclear em 2011 [6]**

O VANT Ararinha (Figura 4) é uma iniciativa acadêmica, com código aberto e de baixo custo, composto por quatro aspectos básicos: aeronave, controle de voo, comunicação e carga paga, e atualmente tem sido desenvolvido pelo GISA (Grupo de Interesse em SisVANTs e Aplicações) no ICMC (Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação) da USP [7].



**Figura 4: Aeronave Ararinha – 11 de maio de 2013, Comando do Exército – Pirassununga, SP.**

## **2.2 Servomotor**

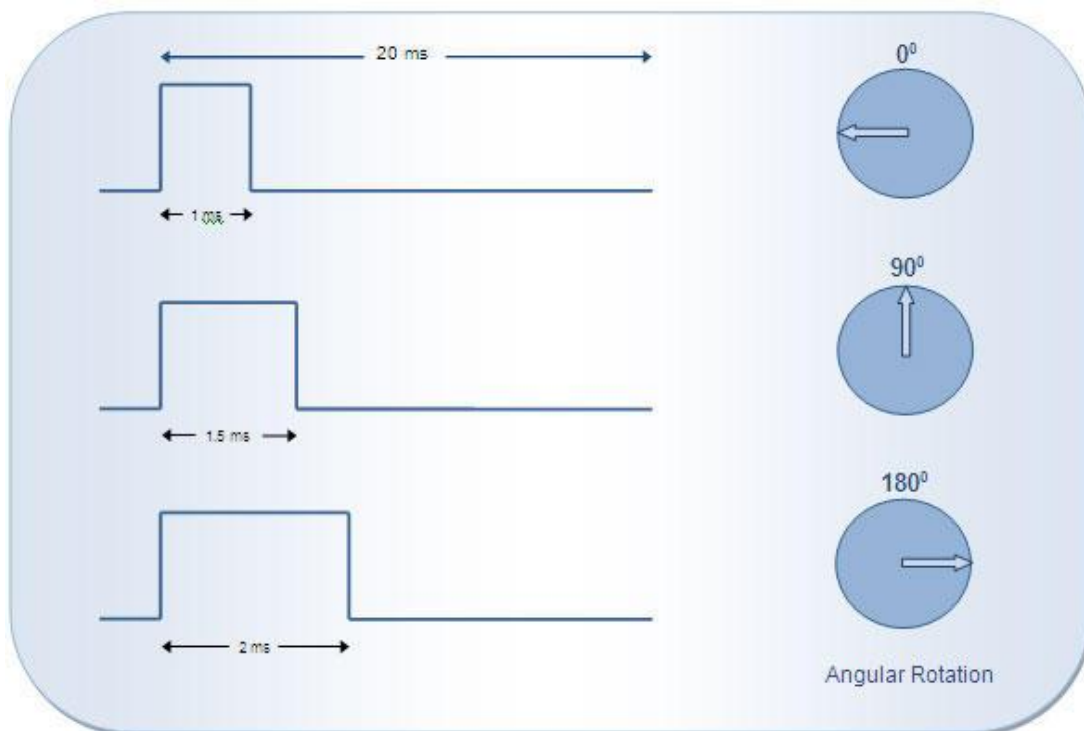
Servomotor, como mostrado na Figura 5, é um tipo de motor específico que permite um preciso controle de sua posição, velocidade e aceleração angulares. Estes são geralmente utilizados em sistemas que necessitam a realizar um movimento de forma rápida, precisa e controlada, em adição, este tipo de motor mantém o seu eixo fixo mesmo que seja forçado por um agente externo para outra posição.





**Figura 5: Servomotor instalado em VANT [8]**

O servo é controlado enviando-se a ele um pulso elétrico de determinada largura através de um canal de controle. Normalmente, o servomotor só pode se movimentar  $90^\circ$  em cada direção (horário e anti-horário) totalizando uma liberdade de movimentação de  $180^\circ$ . Através de um PWM (Modulação por largura de pulso, do inglês *Pulse-Width Modulation*), pulsos elétricos com frequência constante são enviados ao motor. Alterando a largura de pulso, a posição de seu eixo muda linearmente de acordo com a largura do pulso enviado. Uma ilustração sobre o funcionamento do servomotor pode ser visto na Figura 6.



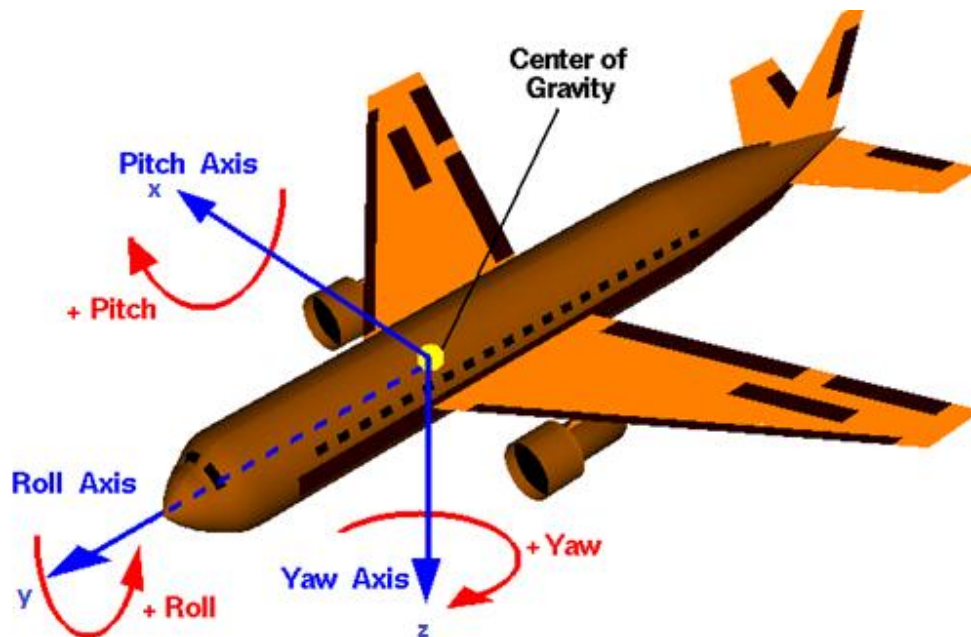
**Figura 6: Ilustração do funcionamento de um servomotor [9]**

Servomotores são em sua maioria projetados com as seguintes especificações:

- Frequência de operação: 50Hz, pulsos são enviados a cada 20ms;
- Largura de pulso mínima: 1 ms (eixo na posição  $0^\circ$ );
- Largura de pulso máxima: 2 ms (eixo na posição  $180^\circ$ );
- Tensão de Alimentação: de 4,8 V a 6 V.

### 2.3 Estabilidade e controle de voo de uma aeronave

Considerando uma aeronave em voo, como na Figura 7, o centro de gravidade e os eixos x, y e z estão fixos. O eixo x está ao longo das asas, o eixo y ao longo da fuselagem e o eixo z está para baixo, e suas origens estão no centro de gravidade.



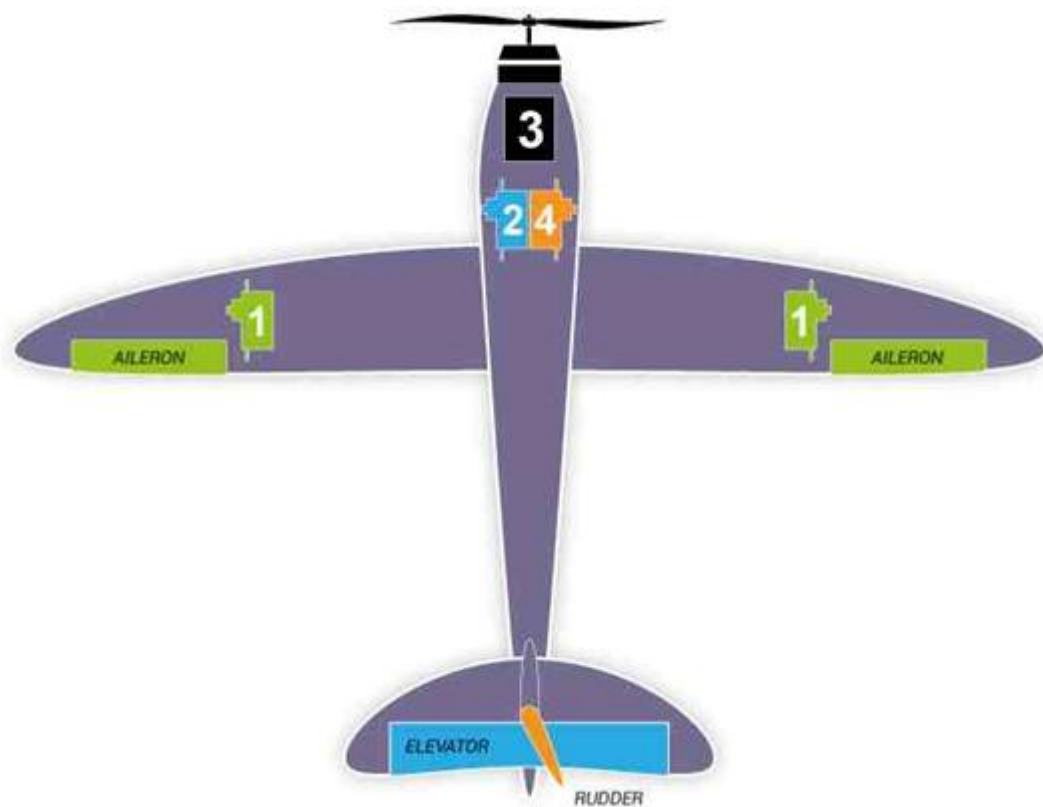
**Figura 7: Definição dos eixos e os movimentos de rotação de uma aeronave [10]**

O movimento de translação de um avião é dado pela velocidade ao longo dos eixos x, y e z e em suas respectivas direções, enquanto o movimento de rotação é dado pela velocidade angular e o momento angular nos mesmos eixos. Os três controles de voo básicos de uma aeronave, aileron, profundor e o leme são construídos para alterar os momentos sobre os eixos x, y e z. O aileron fica localizado geralmente no final da asa e é utilizado para controlar o movimento de rolagem (do

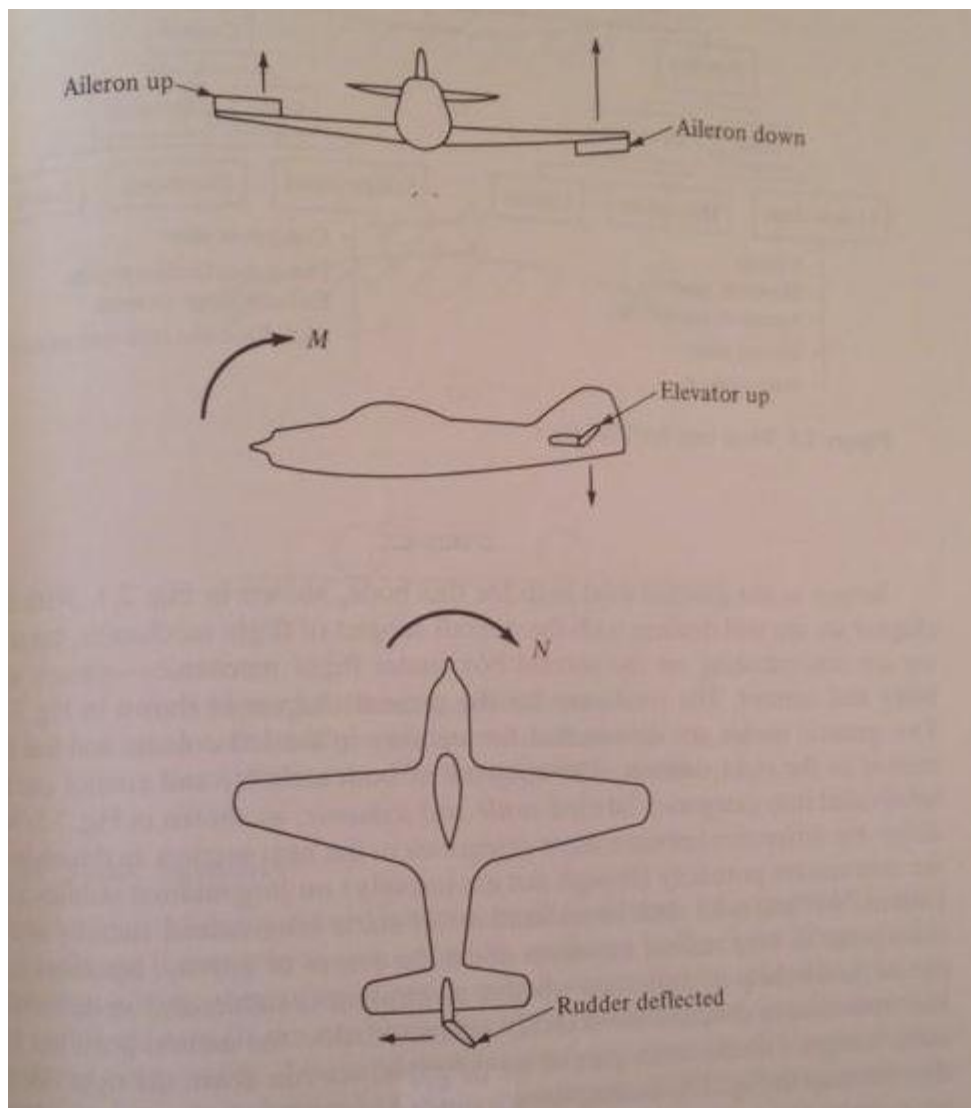


inglês *roll*) pelo eixo y. O profundor fica localizado na extremidade traseira da cauda dos aviões e é responsável pelo movimento arfar (do inglês *pitch*) pelo eixo x, e assim responsável pela estabilização horizontal da aeronave e em adição pela decolagem e pouso da mesma. O leme situa-se na parte traseira do estabilizador vertical e é responsável pelo controle do movimento de guinada (do inglês *yaw*) pelo eixo z [11].

As Figuras 8 e 9 mostram a localização dos ailerons, do profundor e do leme, e uma possível configuração para instalação dos servo-motores. Além disso, é apresentado com mais clareza os efeitos de rotação gerados pela movimentação dos mesmos. Em adicional, na figura 8 é possível ver o controle dos aerilons utilizando os servomotores indicados pelo número 1, dos profundos pelo número 2 e do leme pelo servomotor número 4.



**Figura 8: Possível ligação dos motores Servo para controle do voo de um VANT [12]**



**Figura 9: Momento angular sofrido pela aeronave em influência da movimentação do aerilon, profundor e leme [11]**

### 2.3 Unidade de Medida Inercial

A unidade de medida inercial (IMU, do inglês *Inertial Measurement Unit*) é utilizada para medir em um sistema sua velocidade, orientação e forças gravitacionais que agem sobre o objeto, sendo assim utilizada para a aquisição das medidas necessárias para o funcionamento do giroscópio, do acelerômetro e do magnetômetro do dispositivo eletrônico [13].

Um sistema de navegação inercial faz o uso de acelerômetros e giroscópios para continuamente calcular a posição atual com base na posição anterior, na velocidade e no tempo. Esse sistema pode ser utilizado para calcular a posição e

atitude atual do VANT, similarmente ao GPS, porém sem a necessidade de se comunicar com componentes externos, como satélites. Este processo de navegação é chamado de navegação estimada. Além do uso em VANTs, essa técnica também é utilizada em diversos tipos de navegação, como no caso de navegação marinha e navegação autônoma em robótica.

## 2.4 Sensores

Esta é uma breve introdução sobre o funcionamento dos sensores envolvidos no projeto.

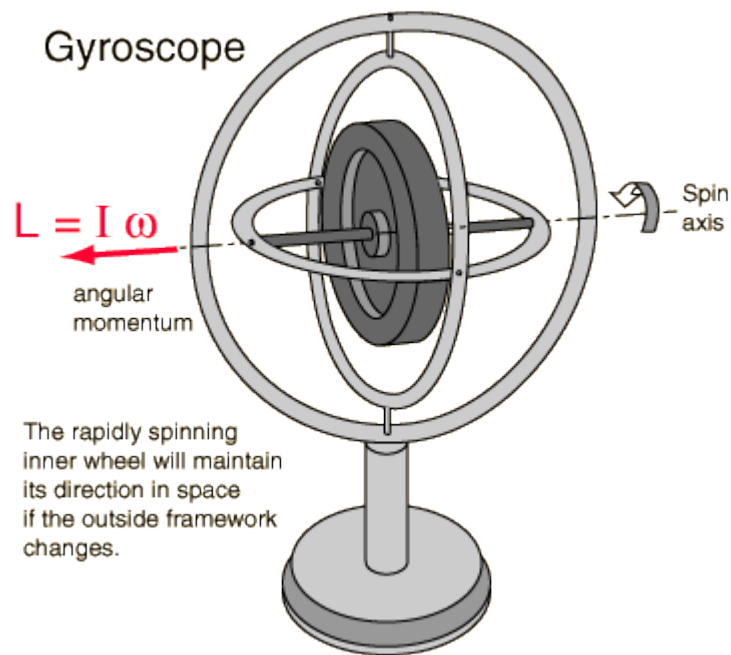
### 2.4.1 Giroscópio

O giroscópio é um dispositivo utilizado para medição e manutenção da orientação de determinado objeto, podendo ser projetado com base nos princípios do momento angular. Este é a medição da quantidade de rotação que um objeto recebe, levando em consideração a sua massa e seu formato e é medido de acordo com a equação (1).

$$L = I \cdot \omega = \vec{r} \times m\vec{v} \quad [14] \quad (1)$$

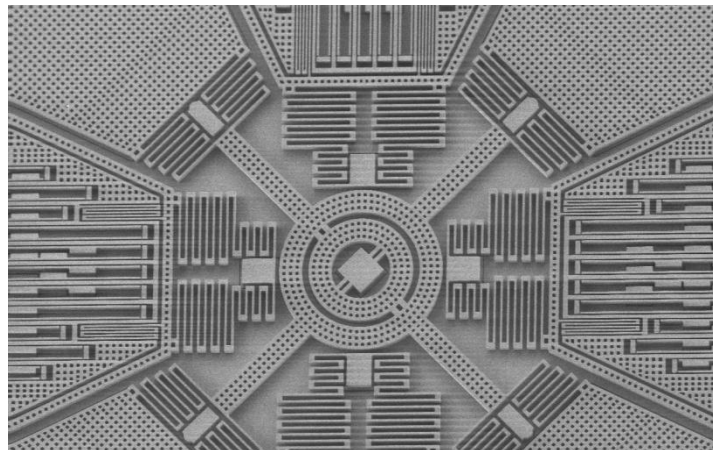
- $L$  – Momento angular, medido em  $\text{kg.m}^2/\text{s}$
- $I$  – Momento de Inércia, medido em  $\text{kg.m}^2$
- $\omega$  – Velocidade angular, medida em  $\text{rad/s}$
- $r$  – raio, medido em  $\text{m}$
- $m$  – massa, medida em  $\text{kg}$
- $v$  – velocidade, medida em  $\text{m/s}$

Um giroscópio convencional, como mostrado no Figura 10, é um mecanismo que contém um rotor que gira em torno de um eixo e anéis articulados com liberdade para rotação. Consiste de eixos giratórios, os quais tem liberdade para realizar rotação em qualquer direção, de acordo com o torque exercido sobre o objeto.



**Figura 10: Princípio de funcionamento de um giroscópio clássico [15]**

Giroscópios podem também ser projetados com outras tecnologias, além do princípio de momento angular, como por exemplo, o giroscópio MEMS (do inglês *microelectromechanical systems*) como visto na Figura 11, utilizando tecnologia de estruturas vibrantes (como no caso do existente no dispositivo que será utilizado neste trabalho), mecânica quântica, entre outros.



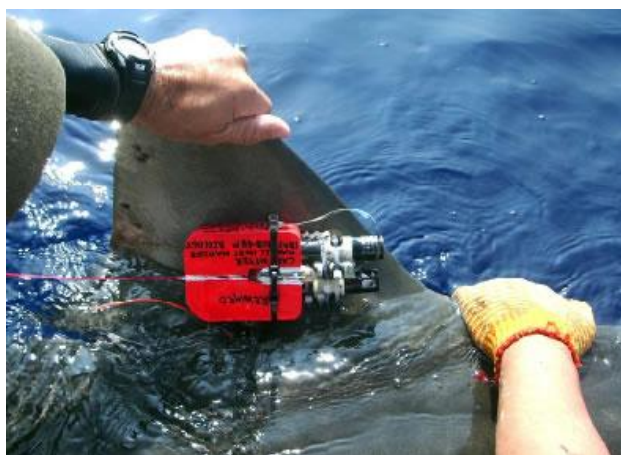
**Figura 11: Exemplo de um giroscópio MEMS [16]**

#### 2.4.2 Acelerômetro

Acelerômetro é um dispositivo eletromecânico que mede forças nas mesmas direções em que um corpo sofre alteração de sua aceleração, essa podendo ser causada devido à gravidade, algum movimento ou vibração que são aplicados ao

dispositivo. Uma utilização do acelerômetro é visto na Figura 12. No caso do acelerômetro piezoelétrico, seu funcionamento acontece de tal maneira que, ao sofrer a ação de uma força, ocorre uma pressão sobre o material piezoelétrico, o que produz uma tensão elétrica proporcional à força a este aplicada. Caso a carga seja proporcional à força e considerando que a massa do material é constante, então a tensão será proporcional à aceleração [17].

Outro tipo de acelerômetro é o capacitivo. Nesse caso, há duas microestruturas próximas uma da outra, o que faz com que exista uma capacitância entre elas. Caso ocorra uma força na estrutura, então essa capacitância irá mudar. Este tipo de dispositivo tem aplicação nas mais diversas áreas, como detecção de terremotos, monitorar vibrações em motores, monitorar o comportamento de animais e para manuseio de celulares.



**Figura 12: Detalhes de um acelerômetro de três eixos e uma câmera acoplados na barbatana dorsal de um tubarão-tigre [18]**

### **2.4.3 Magnetômetro**

O Magnetômetro é um instrumento utilizado para medições relacionadas à força e direção de campos magnéticos. Um grande uso do magnetômetro é para medição do campo magnético da Terra. Ao detectar irregularidades no campo magnético do planeta, esse dispositivo pode indicar a localização de depósitos minerais, como minérios de ferro por exemplo [19].

Outro uso para os magnetômetro, é em detectores de metais para segurança, como por exemplo, em aeroportos, os quais os passageiros passam por um mecanismo detector de metal que tem o seu funcionamento baseado em um magnetômetro. Recentemente, os magnetômetros estão tendo suas dimensões reduzidas e assim podendo ser incorporados a circuitos integrados por um baixo custo,

e assim serem utilizados como bússolas eletrônicas em diversas aplicações, como navegação de robôs ou em *SmartPhones*.

#### 2.4.4 Sensor de Pressão

Sensores de pressão barométrica são responsáveis pela medição de pressão, normalmente aplicados a líquidos ou gases. Este gera um sinal elétrico como resposta a uma pressão aplicada sobre o mesmo. Esses sensores são utilizados indiretamente em diversas aplicações, realizando a medição de alguma grandeza dependente diretamente da pressão, por exemplo: altitude, como na Figura 13 que mostra um altímetro, escoamento de um fluido e medição do nível de um líquido em um reservatório [20].



**Figura 13: Altímetro utilizado para saltos de paraquedas. Centro de paraquedismo, Boituva, SP.**

O sensoriamento de altitude ainda tem utilidade em aviação, foguetes e balões, em todos esses casos faz uso da relação entre a pressão relativa e a altitude, como pode ser visto na equação 2.

$$P_{atm} = 101,3 \cdot \left( \frac{288 - 0,0065 \cdot A}{288} \right)^{5,257} \quad [21] \quad (2)$$

- $P_{atm}$  – Pressão atmosférica, medida em kPa;
- $A$  – Altura, medida em m.

### 2.4.5 Sensor de Pressão Diferencial

O sensor de pressão diferencial é responsável pela medição da diferença entre duas pressões, sendo cada uma delas conectada a um lado diferente do sensor. Estes tipos de sensores são projetados para receber dados de pressão por duas diferentes fontes simultaneamente, e sua saída é proporcional à diferença entre as duas fontes. São amplamente utilizados para medições de diversas propriedades, como por exemplo, a medição do nível de um determinado fluido (este comparando as pressões imersas e emersas ao fluido em questão) ou para ser utilizado como um sensor de velocidade do ar (tubo de Pitot) para um melhor controle de velocidade e uma melhor manipulação do vento que irá cercar a aeronave.

Tecnicamente, a maioria dos sensores de pressão são sensores de pressão diferencial, uma vez que medindo a pressão absoluta ou relativa de um determinado sistema, este é feito em comparação com a pressão ambiente, porém, no caso do sensor diferencial, a câmara de referência de pressão não está selada [22].

A equação para conversão das pressões medidas para a velocidade do ar é calculada da seguinte maneira:

$$v_{air} = \sqrt{\frac{2 \times (P_1 - P_2)}{\rho}} \quad [23] \quad (3)$$

Nessa equação, as variáveis utilizadas são:

- $v_{air}$  - velocidade do ar, medido em m/s;
- $P_i$  - pressão em cada uma das fontes do sensor de pressão diferencial, medido em Pa;
- $\rho$  - densidade do meio, medido em kg/m<sup>3</sup>.

### 2.4.6 GPS

O GPS (Sistema de Posicionamento Global, do Inglês *Global Positioning System*) é um dispositivo que calcula sua posição em tempo real através de sinais que são enviados por satélites em órbita pelo planeta Terra. Nesses sinais estão inclusos o

tempo em que a mensagem foi transmitida e a posição do satélite, para que o dispositivo possa realizar os cálculos de posição desejados [24].

Para devido cálculo da posição atual de um GPS, são utilizadas as seguintes equações de navegação (4), (5) e (6), deste modo utilizando a posição de satélites próximo a este como referência.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = ([\tilde{t}_r + b - t_i]c)^2, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$p_i = (\tilde{t}_r + b - t_i)c \quad (5)$$

$$p_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - bc, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Nessas equações,  $i$  representa o número do satélite em questão que o sinal é adquirido, sendo  $n$  maior ou igual a 4.

- $x, y, z$  - componentes de posição do GPS;
- $\tilde{t}_r$  - tempo de recepção da mensagem;
- $b$  - tempo de atraso do sinal de *clock*;
- $c$  - velocidade da luz;
- $p_i$  - distância entre o GPS e o satélite indicado.

Por meio dessas equações, é possível calcular a distância entre cada satélite pelo receptor. Cada uma das distâncias calculadas e a localização do satélite formam uma esfera, de modo que o receptor está localizado na superfície de cada uma dessas esferas, caso a localização do satélite esteja correta [25]. A figura 14 mostra o funcionamento de um GPS de acordo com o posicionamento dos objetos e dos satélites.



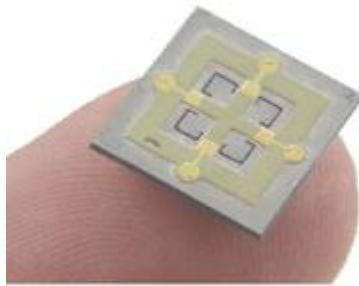


**Figura 14: Interpretação o sistema de rastreamento de um GPS [24]**

Uma vez que as IMU podem apresentar erros de posição, e estes por consequência de seu método de cálculo serão carregados ao calcular a posição seguinte, se faz necessário o uso de um GPS em determinada frequência para correção desses erros e a calibração do sistema de navegação.

## **2.5 Sistemas Microeletromecânicos**

A tecnologia utilizada para fabricação em escala micrométrica de transdutores, atuadores, componentes elétricos e semicondutores entre outros é conhecida como sistemas microeletromecânicos. MEMS são dispositivos integrados, que fazem a combinação de elementos elétricos, eletrônicos e mecânicos para realizar tarefas como, por exemplo sensoriamento [26]. As dimensões de comprimento dos componentes variam entre 1  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , enquanto que a dimensão do dispositivo MEMS normalmente varia entre 20  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$ .

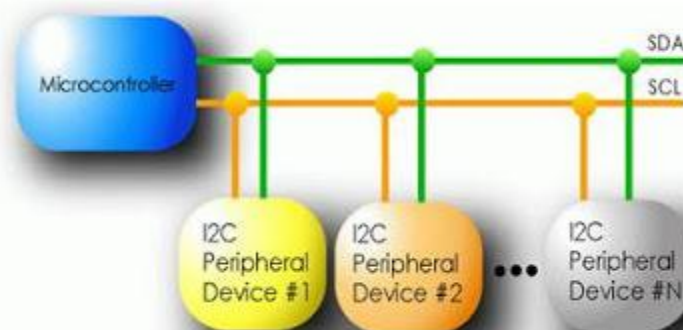


**Figura 15: Exemplo de um Acelerômetro MEMS [27]**

O fato de um MEMS que contém micro sensores, micro atuadores e outras tecnologias poder ser integrado em um único *microchip*, como na Figura 15, faz com que sejam importantes tecnologias para o controle de navegação de veículos autônomos. Os dispositivos MEMS possuem aplicações em diversos setores, sendo utilizados em impressoras jato de tinta, acelerômetro para sistema de *airbag* de carros, acelerômetros em dispositivos eletrônicos, como no caso do sensor de movimentos do controle de *video game* Nintendo Wii e de *Smartphones*, entre outros.

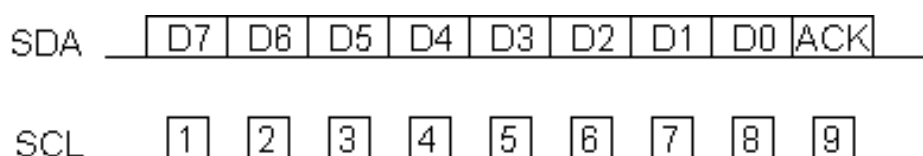
## 2.6 Barramento I<sup>2</sup>C

I<sup>2</sup>C (Circuito Inter Integrado, do inglês Inter-Integrated Circuit), também referido como I2C, é um barramento serial (cada bit é enviado sequencialmente por um único barramento de dados), multimestre (um barramento com vários nós utilizado para transferência de dados, por exemplo, utilizado para acesso direto entre o periférico e a memória, sem a necessidade do uso da unidade central de processamento para esta tarefa). Este barramento foi desenvolvido pela empresa holandesa *Philips* [28].



**Figura 16: Barramento I<sup>2</sup>C ligado a diversos dispositivos e um microcontrolador [29]**

No esquemático representado pela Figura 16, o barramento SCL (do inglês, *Serial Clock*) é a linha de *clock* que é utilizada para sincronizar a transferência de dados pelo barramento I<sup>2</sup>C. SDA (Linha de dados serial, do inglês *Serial Data*) é a linha de dados que trafega entre os periféricos e o dispositivo ao qual estão conectados, como na figura 17.



**Figura 17: Exemplo de como funciona a transferência de dados na comunicação I<sup>2</sup>C [28]**

Dentre as principais vantagens desse sistema de comunicação estão:

- são necessárias apenas dois condutores de barramento;
- não há necessidade de um *baud rate* específico para comunicação, uma vez que o *clock* é gerado pelo mestre através do SCL;
- fácil relação mestre/escravo entre os componentes, uma vez que cada dispositivo conectado ao barramento é endereçável via software por um endereço único.

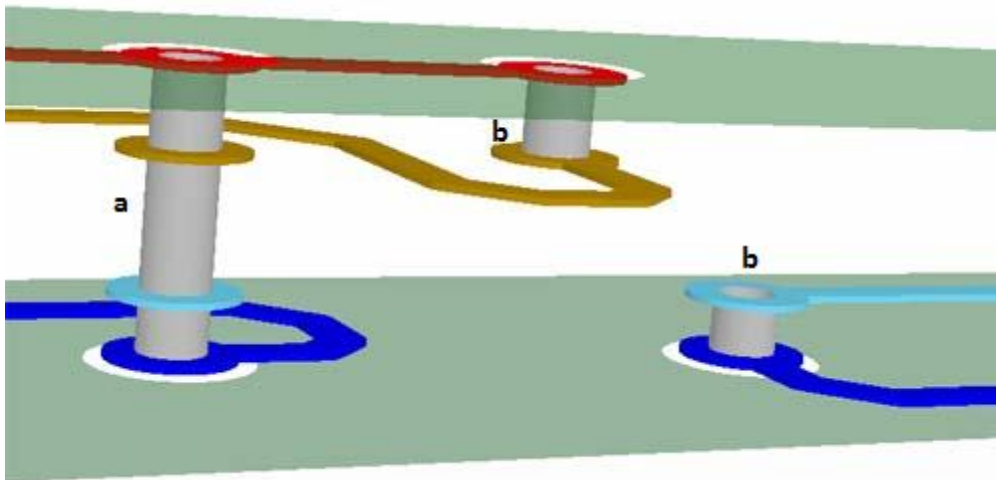
Este sistema foi inicialmente desenvolvido para comunicação em baixa velocidade entre periféricos e uma placa mãe, sistemas embarcados, telefones entre outros dispositivos eletrônicos. A velocidade de comunicação original para esse tipo de comunicação desenvolvido era de no máximo 100kbit por segundo, porém há também um modo de transmissão a 400kbit por segundo (modo de transmissão rápido) e desde 1998 a 3,4Mbit por segundo (modo de transmissão de alta velocidade) [28].

## 2.7 Placa de Circuito Impresso

Uma placa de circuito impresso, também chamado de PCB (do inglês *Printed Circuit Board*) sustenta mecânicamente os sensores e componentes eletrônicos a que ela estão conectados, além de realizar a ligação elétrica entre eles [30].

A ligação elétrica é feita principalmente utilizando as trilhas condutoras. Estas trilhas são feitas de modo que uma fina camada de material condutor, por exemplo, cobre ou prata, são corroídas de forma que o que resta na PCB são apenas as trilhas

em si. No caso da placa de circuito impresso possuir múltiplas camadas, estas são interligadas por meio das *vias*.



**Figura 18: Vias interligando as camadas de uma placa de circuito impresso de quatro camadas, estas camadas sendo representadas pelas cores: vermelho, amarelo, azul ciano e azul escuro [31]**

Na Figura 18 é possível observar dois tipos distintos de *via*. As chamadas *blind vias*, mostrado na figura em questão pela letra b, são as vias que estão conectadas entre a camada interna do material condutor e uma outra camada externa. Já, as chamadas de *Thru-hole* atravessam todas as camadas, não necessariamente fazendo conexão com as camadas internas da placa de circuito impresso. Há também um outro tipo de *via* chamado de *buried via*, esta última faz conexão apenas entre as camadas internas da PCB.

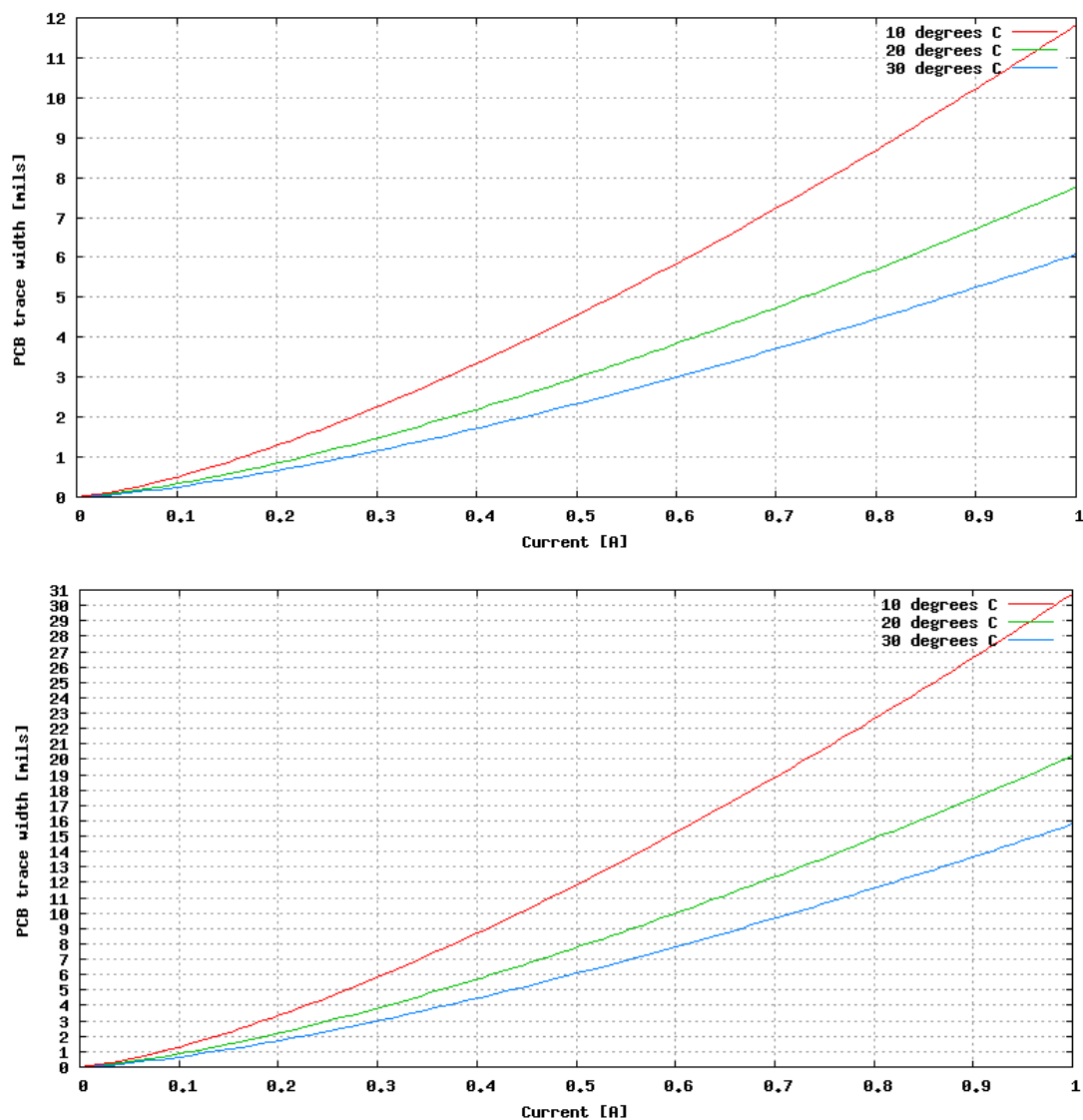
A IPC (nome original em inglês: *Institute for Printed Circuits*), também conhecida como Association Connecting Electronics Industries, tem como objetivo padronizar a montagem e a produção de equipamentos eletrônicos [32]. De acordo com a IPC-2221, Padrão Genérico para Placas de Circuito Impresso, o cálculo da corrente elétrica que cada trilha da placa de circuito impresso suporta é feito da seguinte maneira:

$$i = K \times \Delta T^{0.44} \times A_c^{0.725} \quad [33] \quad (7)$$

- $i$  – corrente elétrica, medida em Amperes
- $K$  – constante que equivale a 0,48 se é uma camada externa ou 0,24 caso seja utilizado o cálculo em uma camada interna;
- $\Delta T$  – aumento da temperatura em graus celcius;

- $A_c$  – Área da trilha condutora medido em mils<sup>2</sup> (a espessura das placas de circuito impresso normalmente é de 35µm).

De acordo com a Equação 7, e a Figura 19, pode ser visto uma comparação entre as correntes elétricas em ambas as camadas da placa de circuito impresso em comparação com a largura da trilha. O gráfico superior representa uma trilha externa enquanto que o gráfico inferior representa a corrente elétrica nas trilhas internas. Uma similaridade pode ser vista entre os gráficos devido ao fato de a única alteração entre eles é a constante K da Equação 7.



**Figura 19: Gráfico da largura da trilha medido em milésimo de polegada (eixo y) pela corrente suportada pela trilha (eixo x) [30]**

Existem inúmeros *softwares* que auxiliam no projeto e construção de placas de circuito impresso. Nesse trabalho o software escolhido para o design do layout da

placa é o EAGLE (*Easily Applicable Graphical Layout Editor*) da empresa CadSoft Computer. Este software é popular entre as pequenas empresas de design de placas de circuito impresso e no meio acadêmico devido ao fato de possuir termos de licença favoráveis e um vasta biblioteca de componentes na internet [34].

## 2.8 ArduPilot

O sistema que será desenvolvido nesse trabalho tem como embasamento um projeto já existente e conhecido como ArduPilot, que será apresentado nesta seção.

O ArduPilot, também referido como APM (ArduPilot Mega), é uma plataforma para VANTs de código aberto (também conhecido como *software* livre), utilizado para controle autônomo de aeronaves dos mais variados tipos, que foi criado em 2007 pela comunidade de interessados em VANTs *DIY Drones*. [35] Seu nome tem origem do Arduino, uma plataforma computacional de código aberto baseada em uma placa com microcontrolador, com a capacidade de obter aquisições por sensores e controlar atividades de acordo com o software nele programado [36], já que a primeira versão da placa APM autopilot teve como base o ambiente de desenvolvimento do Arduino [37].

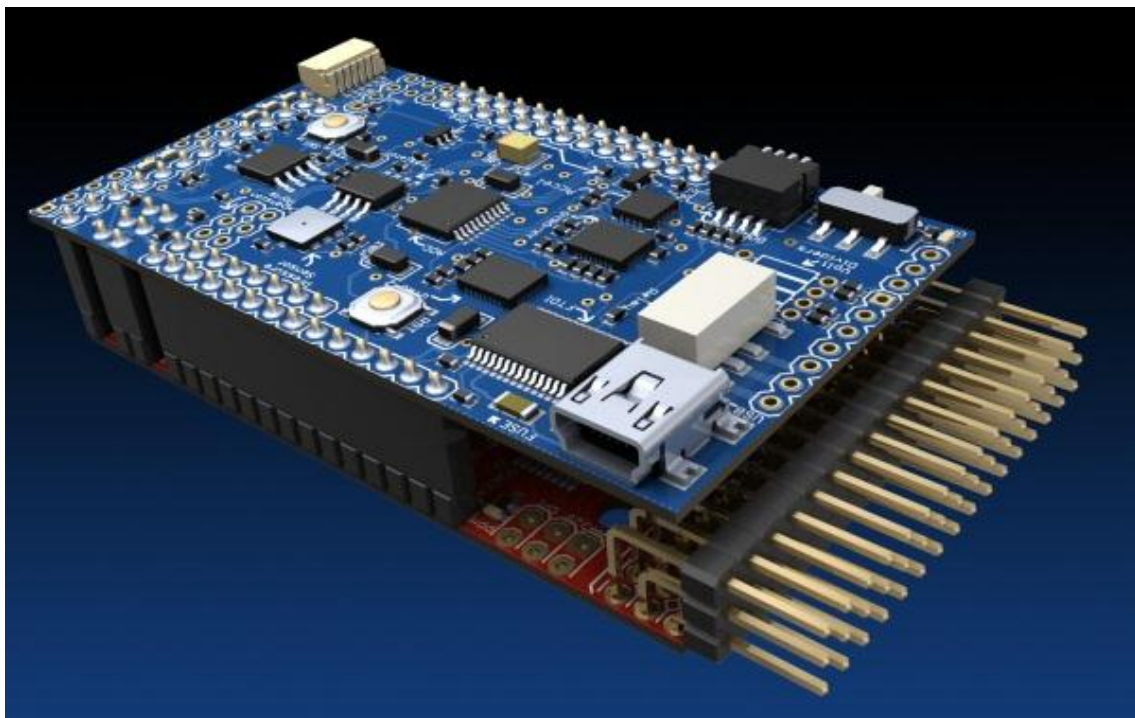


Figura 20: ArduPilot Mega 1.5[35].



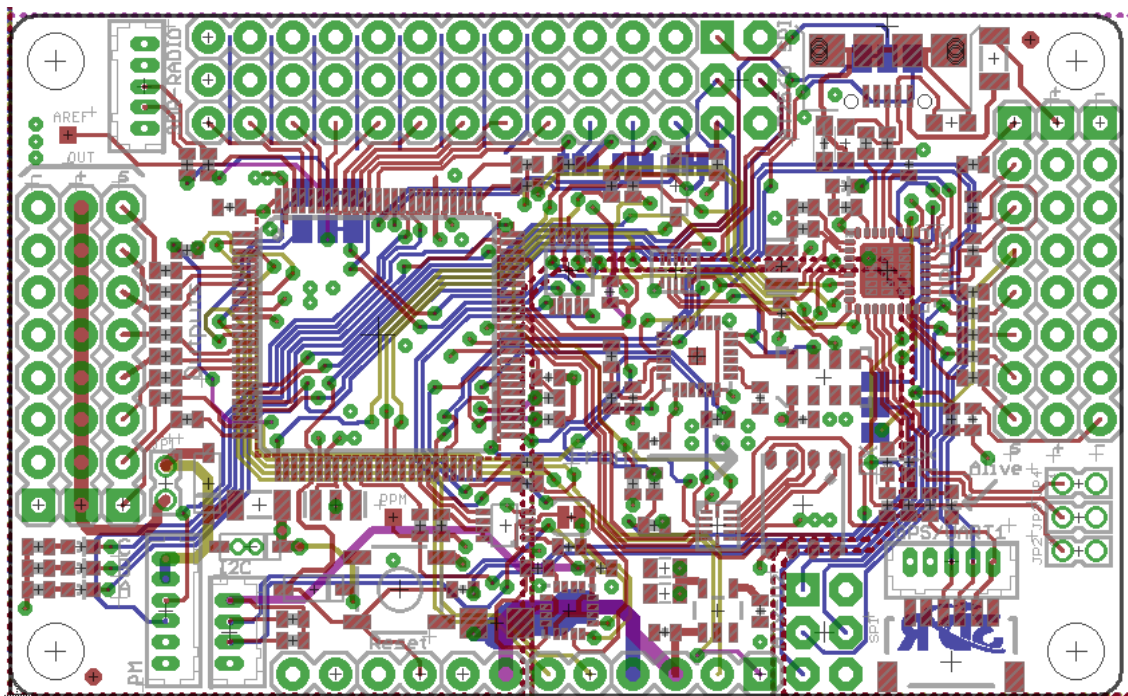
O conjunto do APM 1.5 consiste de duas placas, como é visto na Figura 20, a ArduPilot Mega *Board* (também conhecido como *red board*) e o ArduPilotMega Shield (também conhecido como *blue board*). Nessa versão do ArduPilot, a *red board* contém os processadores e as conexões para os servomotores e a recepção dos sinais de rádio, enquanto que na *blue board* estão conectados os sensores e módulo GPS responsáveis pela aquisição dos sinais e manutenção do voo da aeronave.

A versão 2.5 do ArduPilot, essa sendo a versão mais moderna da placa, será a utilizada neste trabalho como base para o desenvolvimento do projeto. Nesta versão, todos os sensores e componentes eletrônicos estão em uma única placa, possuindo assim uma complexidade menor para o usuário.

No ArduPilot Mega 2.5 pode ser observado o seguinte:

- Microcontrolador ATmega2560 com *clock* de 16MHz;
- Circuito de segurança para caso ocorra falhas utilizando um circuito contendo um *chip* multiplexador e um processador ATmega32U2;
- Oito canais de controle de rádio, incluindo a opção de ligar e desligar o piloto automático;
- Conectores para adesão de novos sensores e GPS;
- Construído em uma placa de quatro camadas que pode ser visto na Figura 21.
- Giroscópio para os três eixos;
- Acelerômetro para os três eixos;
- Sensor de pressão barométrica para altitude.

Cada uma das camadas vistas na Figura 21 é visualizada pelas diferentes cores de suas trilhas: vermelho, azul, amarelo e magenta. As vias, responsáveis pelas conexões entre as diferentes camadas são vistas pela cor verde.



**Figura 21: Projeto da placa de circuito impresso do ArduPilot 2.5 [38]**

## 2.9 Mission Planner

Mission Planner é um software gratuito, de código aberto para sistema operacional Windows e sua tela inicial pode ser vista na figura 22. Com ele, é possível criar ou selecionar missões pré existentes para que a aeronave realize [39]. Dentre as funções que esse software tem acesso estão:

- Uso do Google Maps para selecionar os pontos do caminho da aeronave;
- Selecionar comandos de missão já existentes;
- Download dos arquivos do log da missão e análise dos mesmos;
- Configuração do APM conforme os sensores novos acoplados;
- Interface com PC flight simulator;
- Analisar as saídas pelas conexões seriais da placa APM, como os giroscópios e acelerômetros;
- Seleção de qual é o tipo de VANT que irá voar.





Figura 22: Tela inicial do software Mission Planner



### 3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este capítulo do trabalho mostra os componentes que foram mantidos entre o ArduPilot 2.5 e a nova placa do sistema de controle para VANTs desenvolvido. Em adicional, são apresentados os novos componentes eletrônicos que substituem outros componentes menos modernos e novos sensores que serão integrados à placa, permitindo assim que outras medidas sejam utilizadas no voo autônomo da aeronave. Uma comparação entre os dispositivos adicionados e mantidos pode ser visto na Tabela 1.

| Dispositivos                  | ArduPilot 2.5         | Sistema de Controle Desenvolvido |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Processadores                 | Atmega2560/Atmega32U2 | Atmega2560/Atmega32U2            |
| Sensor de Pressão Barométrica | MS5611-01BA           | MS5611-01BA                      |
| Multiplexador                 | TS5A23157             | TS5A23157                        |
| Memória de Dados              | AT45DB161D            | AT45DB161D                       |
| Giroscópio / Acelerômetro     | MPU6000               | MPU9150                          |
| Magnetômetro                  | HMC5883L              |                                  |
| Sensor de Pressão Diferencial | -                     | MPXV7002dp                       |
| GPS                           | -                     | u-blox 6Q                        |

**Tabela 1: Comparação entre os componentes existentes no ArduPilot 2.5 e os que serão utilizados na nova placa desenvolvida**

#### 3.1 Dispositivos em comum com o ArduPilot 2.5

Os componentes que estão no projeto do controlador de voo que também estão presente no APM 2.5 (ArduPilot Mega 2.5) estão aqui descritos.

### 3.1.1 Microcontrolador ATmega2560

O Atmega2560 (Figura 23) é um microcontrolador desenvolvido pela Atmel 8-bit com arquitetura RISC (Computador com um Conjunto Reduzido de Instruções, do inglês *Reduced Instruction Set Computer*). Este microcontrolador possui 54 pinos para entrada e saída digitais, os quais 15 podem ser utilizados como saídas PWM, 16 pinos de entrada analógicos e 4 UARTs (do inglês, *Universal asynchronous receiver/transmitter*) [40]. O microcontrolador tem a função principal de adquirir e realizar os cálculos necessários dos sensores e do rádio controlador para controlar o voo da aeronave, dependendo do modo que este foi pré-programado.

Nesse projeto, decidiu-se manter o processador do APM 2.5 para que se possa testar as demais alterações da placa, mantendo-se compatibilidade com software atual. Uma vez que as alterações propostas nesse projeto sejam testadas, será proposto em um trabalho futuro a alteração do processador Atmega2560 para um ARM de maior capacidade, mesmo que isso implique em reescrever todo o software da placa.



Figura 23: Microcontrolador Atmega2560 [40]

### 3.1.2 Microcontrolador Atmega32U2

O Atmega32U2 (Figura 24), assim como o Atmega2560, é um microcontrolador CMOS 8-bit desenvolvido pela Atmel com arquitetura RISC. O dispositivo permite que a ISP (do inglês *In-System Programming*) memória flash seja reprogramável por uma entrada de interface serial SPI (do inglês *Serial Peripheral Interface*).

Sua função nesse projeto, e também no ArduPilot é de converter os sinais de rádio PWM ou PCM (Modulação por códigos de pulso) para sinais PPM (Modulação

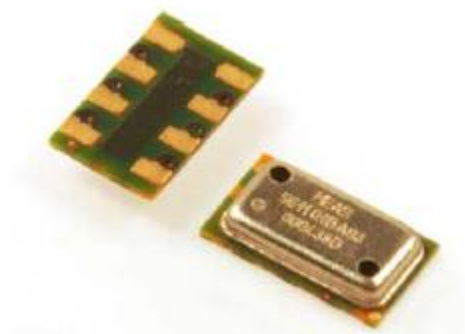
por posição de pulso) caso o Rádio Controle(RC) esteja acoplado e enviar as informações necessárias para o microcontrolador Atmega2560, que realizará o envio dos dados para os servo-motores ou as ESC (do inglês *Electronic Speed Control*) que controlam os motores da aeronave. O firmware deste dispositivo também controla a conexão USB com o Atmega2560 [41], de modo a definir uma rota autônoma, sem o uso do rádio controlador, ou para realizar determinadas funções caso o mesmo perca o sinal do rádio. No Ardupilot, isto é realizado com o auxílio do software *Mission Planner*.



**Figura 24: Microcontrolador Atmega32U2 [42]**

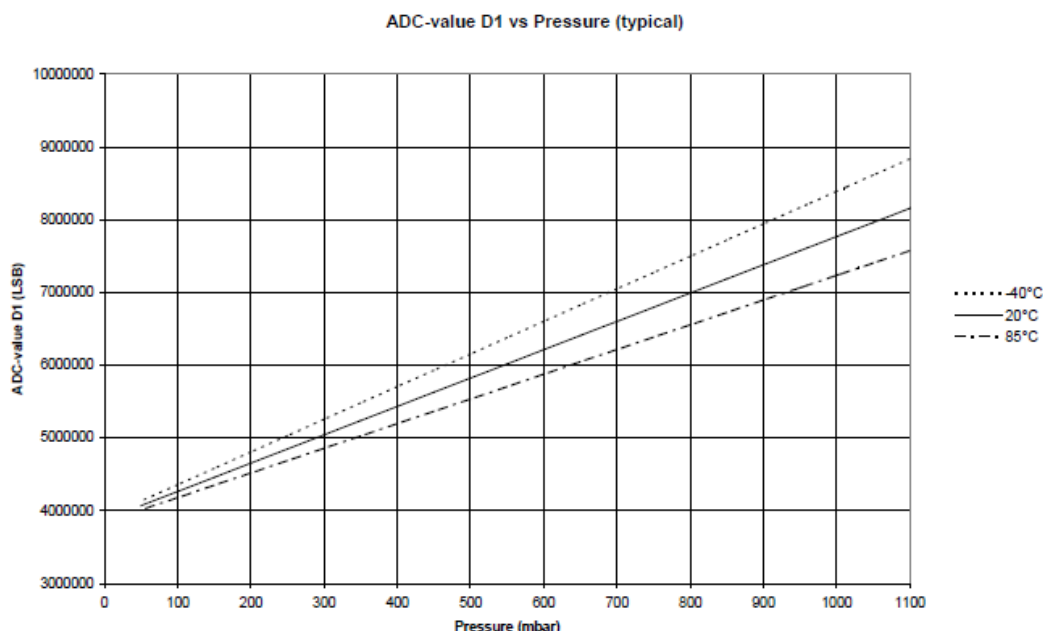
### **3.1.3 Sensor de Pressão – MS5611-01BA**

Este sensor de pressão faz parte de uma nova geração com alta resolução desenvolvidos pela MEAS Switzerland que possui interface de comunicação SPI (do inglês, *Serial Peripheral Interface*) e I<sup>2</sup>C, para serem utilizadas de acordo com as necessidades do usuário. É utilizado principalmente em sistemas barométricos, computação embarcada, variômetros e navegação.



**Figura 25: Sensor de Pressão Barométrica MS5611-01BA [43]**

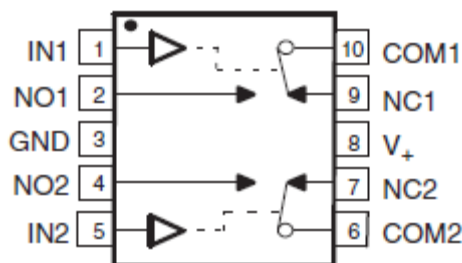
O MS5611-01BA (Figura 25) é otimizado para altímetros com um erro máximo de 10cm em sua pressão de operação (de 450mbar a 1100mbar, que equivale a uma altitude de aproximadamente -700m a 6340m) e sua saída digital possui 24 bits[43] e pode ser observado pelo gráfico da Figura 26.



**Figura 26: Gráfico da saída ADC do MS5611-01BA x Pressão [43]**

### 3.1.4 Multiplexador – TS5A23157

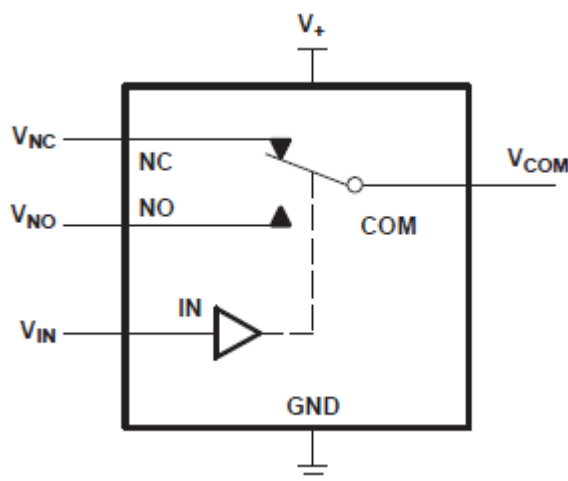
O TS5A23157 (ver figura 27) é um multiplexador com faixa de operação entre 1,65V e 5,5V. Este dispositivo pode ser utilizado tanto com sinal analógico como digital [44].



**Figura 27: Pinos dos Multiplexador – TSA5A23157 [44]**

Esse dispositivo funciona da seguinte maneira: caso os pinos IN1 e IN2 estejam em estado alto, os pinos COM1 e COM2 estarão conectados aos pinos NO1 e NO2. Caso contrário, IN1 e IN2 estejam em estado baixo, os pinos COM1 e COM2

estarão conectados aos pinos NC1 e NC2. Esse funcionamento está mostrado na Figura 28 e Tabela 2 e é utilizado nesse projeto para que os dados sejam recebido ou enviados pelo Atmega2560, ou para que estes dados sejam recebido pelo microcontrolador PPM ou pelo rádio responsável pela telemetria, caso seja utilizado.



**Figura 28: Conexão do pino COM de acordo com a tensão no pino IN [44]**

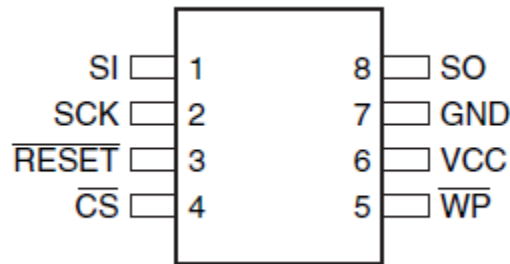
| Input IN | COM to NC | COM to NO |
|----------|-----------|-----------|
| Low      | On        | Off       |
| Hlgh     | Off       | On        |

**Tabela 2: Tabela da conexão do multiplexador TSA5A23157 [44]**

### 3.1.5 Memória de dados – AT45DB161D

Esta memória, mostrada na Figura 29, tem a função de salvar os dados do log das atividades realizadas pela aeronave, como a velocidade atingida, altitude e as coordenadas em que sobrevoou, tendo um comportamento parecido com a caixa-preta em aviões convencionais.

Possui 16 Megabits de memória e interface para comunicação SPI. Nesse tipo de comunicação, o chip é selecionado através do pino CS, e acessado por uma interface de apenas três cabos pelos pinos de Serial Input (SI), Serial Output (SO) e Serial Clock (SCK). [45]



**Figura 29: Pinos da memória de dados AT45DB161D [45]**

### **3.2 Sensores que serão adicionados ao Circuito Impresso do Projeto De Controle**

A adição dos novos sensores se dá ao fato de que novas medidas são necessárias para um melhor controle sobre o voo da aeronave. Em adicional, alguns sensores como o giroscópio foi substituído por outro sensor mais moderno.

Devido à adição do GPS à placa de circuito impresso, é necessário que a placa toda seja elevada se for utilizada para controlar o voo de um multirrotor. Isso se deve ao fato de que os ruídos gerados pelos ESCs de cada motor não tenham influência sobre os dados recebidos pelo GPS

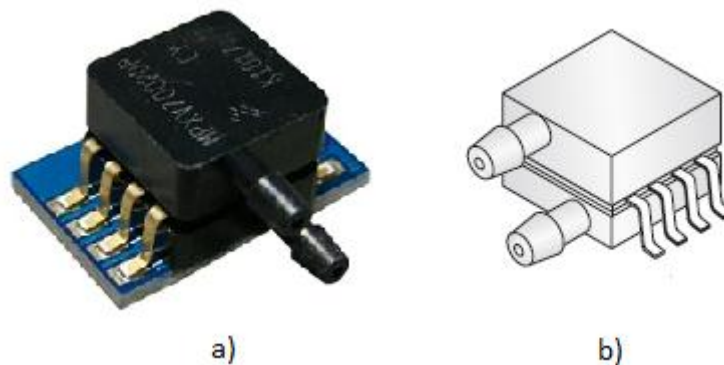
#### **3.2.1 Sensor de Pressão Diferencial – MPXV7002dp**

As especificações técnicas do dispositivo mpxv7002dp para operação a 25°C são:

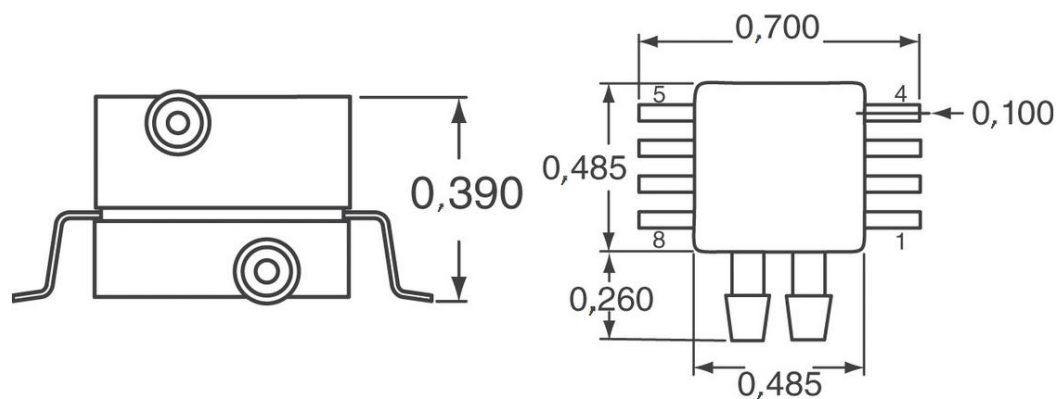
- Faixa da tensão elétrica de alimentação: 4,75 V a 5,25 V;
- Máximo consumo de corrente: 10 mA;
- Sensibilidade de Leitura de dados: 1 V/kPa;
- Faixa de pressão diferencial: -2,0 kPa a 2,0 kPa;
- Faixa de tensão de saída para essa faixa de pressão: 0,5V a 4,5 V.

As especificações mecânicas para implementação do projeto estão indicados nas Figuras 30 e 31.





**Figura 30: Sensor de pressão diferencial mpxv7002dp (Foto real e Esquemático)**  
[46]



**Figura 31: Layout do sensor de pressão diferencia MPXV7002dp para placa de circuito impresso** [46]

O sensor de pressão diferencial MPXV7002dp possui apenas saída analógica, no entanto, há no microcontrolador Atmega 2560 uma série de portas que faz a conversão analógico/digital internamente, utilizando apenas uma tensão de referência, fazendo com que não haja necessidade do uso de um conversor AD no projeto.

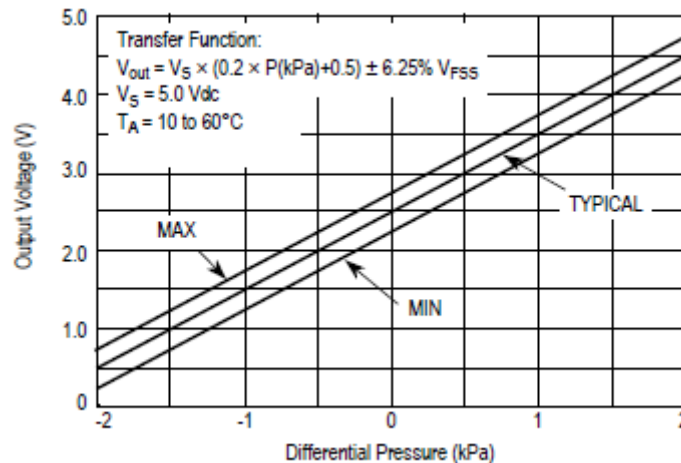
Os detalhes de cada terminal do sensor estão indicados na Tabela 3. Com base nela, também pode ser observado a simplicidade do sensor, pois apenas 3 dos terminais são ativos (Tensão de alimentação, terra e tensão elétrica de saída).

| Número do Terminal | Mnemônico        | Descrição                  |
|--------------------|------------------|----------------------------|
| 1,5,6,7,8          | NC               | Não conectado              |
| 2                  | VS               | Tensão de alimentação (5V) |
| 3                  | GND              | Terra                      |
| 4                  | V <sub>OUT</sub> | Tensão elétrica de saída   |

**Tabela 3: Terminais do Sensor de pressão mpxv7002dp** [46]

Outra coisa que pode ser observado para a escolha desse sensor é a linearidade que ele apresenta para pressões diferenciais com diferentes temperaturas e seu alcance para pressões que diferem entre -2kPa e +2kPa. Isto pode ser observado na Figura 32.

Utilizando a equação 3, é possível estimar a máxima velocidade medida por esse sensor como sendo  $v_{air} = 55,1 \text{ m/s}$ .



**Figura 32: Gráfico de tensão de saída (eixo y) por pressão diferencial medida (eixo x) [46]**

Este sensor foi escolhido para possibilitar a instalação de um Tubo de Pitot para que seja possível determinar a velocidade da aeronave em relação ao ar.

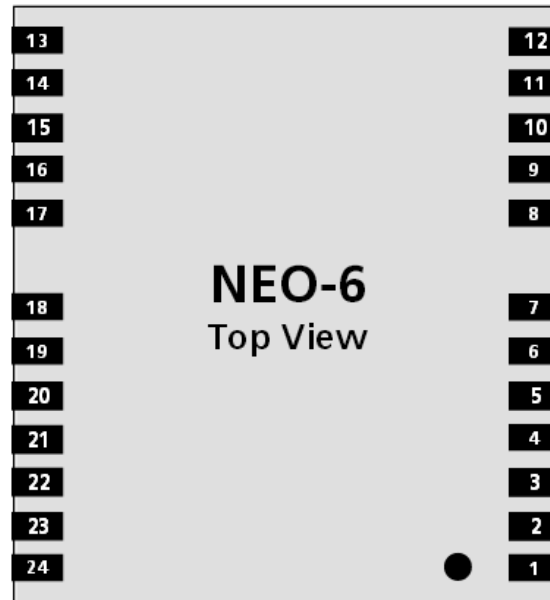
### 3.2.2 GPS - u-blox 6Q - série NEO-6

As especificações técnicas deste dispositivo para operação a 25°C são:

- Faixa da tensão elétrica de alimentação: 2,7 V a 3,6 V;
- Máximo consumo de corrente: 67 mA;
- Precisão de Leitura de dados: 8 bits;
- Máxima taxa de atualização de dados: 5 Hz.

Esse dispositivo se conecta com o microcontrolador utilizando a interface de comunicação que transforma dados paralelos em serial UART. No entanto, também apresenta interface de comunicação SPI para se conectar a outros dispositivos, como por exemplo, uma memória de dados, sem a necessidade dos dados serem enviados

para o microcontrolador previamente. Os detalhes sobre os terminais do GPS u-blox 6Q estão na Figura 33 e Tabela 4.



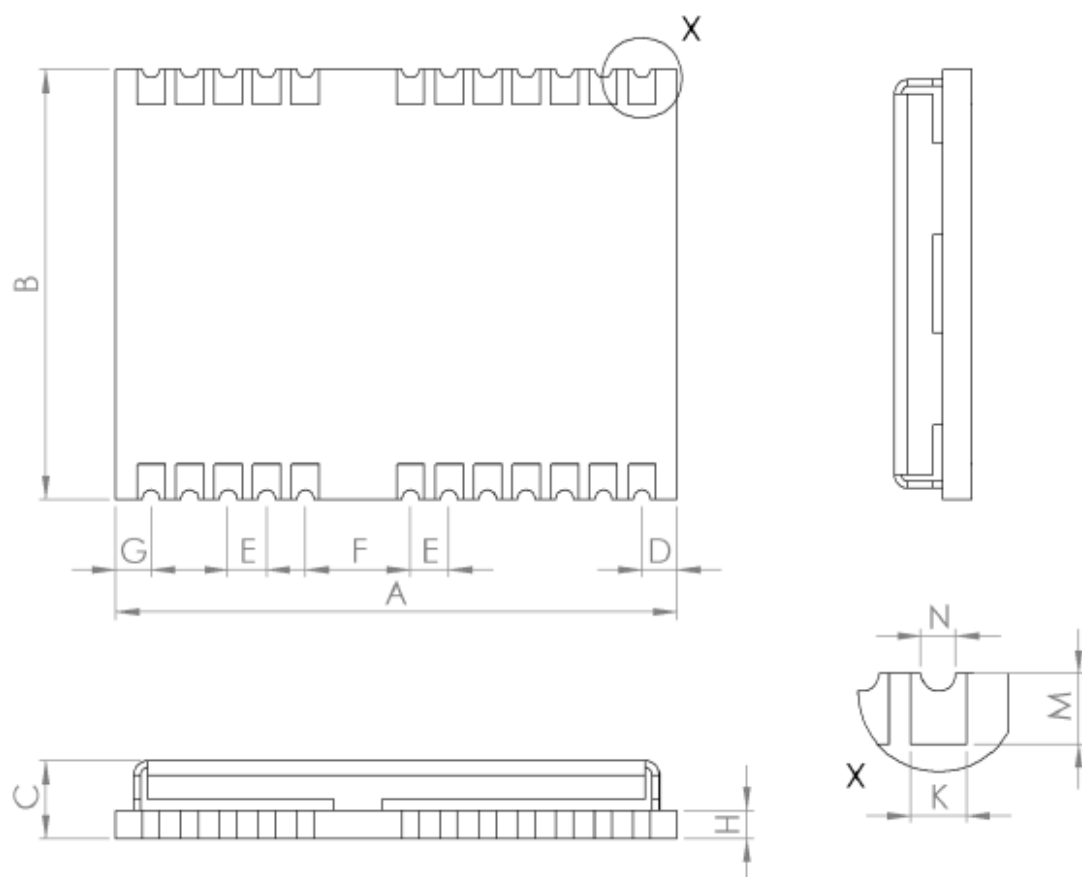
**Figura 33: Terminais do GPS u-blox 6Q [47]**

| Número do Terminal | Entrada/Saída | Mnemônico | Descrição                          |
|--------------------|---------------|-----------|------------------------------------|
| 1, 17              | Entrada       | Reserved  | Reservado                          |
| 2                  | Entrada       | SS_N      | Seleção do pino escravo SPI        |
| 3                  | Saída         | TIMEPULSE | Pulso do tempo (1pps)              |
| 4                  | Entrada       | EXTINT0   | Interrupção externa                |
| 5                  | Entrada/Saída | USB_DM    | Dados USB                          |
| 6                  | Entrada/Saída | USB_DP    | Dados USB                          |
| 7                  | Entrada       | VDDUSB    | Tensão de alimentação USB          |
| 8                  | -             | Reservado | Deve ser conectado junto ao pino 9 |
| 9                  | Saída         | VCC_RF    | Tensão de Saída RF                 |
| 10                 | Entrada       | GND       | Terra                              |
| 11                 | Entrada       | RF_IN     | Entrada do sinal do GPS (Antena)   |
| 12, 13, 24         | Entrada       | GND       | Terra                              |

|    |               |               |   |
|----|---------------|---------------|---|
| 14 | Saída/Entrada | MOSI/CFG_COM0 | Configuração o pino SPI MOSI. Deixar em aberto caso não seja utilizado    |
| 5  | Entrada       | MISO/CFG_COM1 | Configuração o pino SPI MISO. Deixar em aberto caso não seja utilizado    |
| 16 | Entrada       | CFG_GPS0/SCK  | Configuração do modo de energia. Deixar em aberto caso não seja utilizado |
| 18 | Entrada/Saída | SDA2          | Dados DDC   |
| 19 | Entrada/Saída | SCL2          | <i>Clock</i> DDC  |
| 20 | Saída         | TxD1          | Porta Serial 1  |
| 21 | Entrada       | RxD1          | Porta Serial 1  |
| 22 | Entrada       | V_BCKP        | <i>Backup</i> da tensão de alimentação                                    |
| 23 | Entrada       | VCC           | Tensão de alimentação   |

**Tabela 4 : Terminais do GPS u-blox 6Q [47]**

Na Figura 34 e Tabela 5 estão os dados do *layout* do GPS u-blox 6Q, utilizados para criação do *footprint* para ser adicionado à placa de circuito impresso.



**Figura 34: Layout do GPS u-blox 6Q para placa de circuito impresso [47]**

| Símbolo | Dimensão Típica (mm) |
|---------|----------------------|
| A       | 16,0                 |
| B       | 12,2                 |
| C       | 2,4                  |
| D       | 1,0                  |
| E       | 1,1                  |
| F       | 3,0                  |
| G       | 1,0                  |
| H       | 0,82                 |
| K       | 0,8                  |
| M       | 0,9                  |
| N       | 0,5                  |
| Massa   | 1,6g                 |

**Tabela 5: Dimensões do GPS u-blox 6Q [47]**

### 3.2.3 Rastreador de movimento – MPU-9150

O MPU-9150 é o primeiro rastreador de movimento integrado que é composto por um giroscópio, um acelerômetro e um magnetômetro. ambos sensíveis aos três eixos, x, y e z.

Este dispositivo faz uso da unidade de medida inercial previamente descrita para informar e monitorar a rota da aeronave, tornando possível, com a utilização dos sensores envolvidos no rastreador de movimentos, medir continuamente a velocidade angular e a aceleração linear respectivamente, e assim rastrear a posição e orientação do corpo em que o dispositivo está acoplado. [48]

Na Figura 35 e Tabela 6 estão os pinos do rastreador de movimento MPU-9150 e a descrição da utilização de cada uma dessas entradas e saídas para o componente.

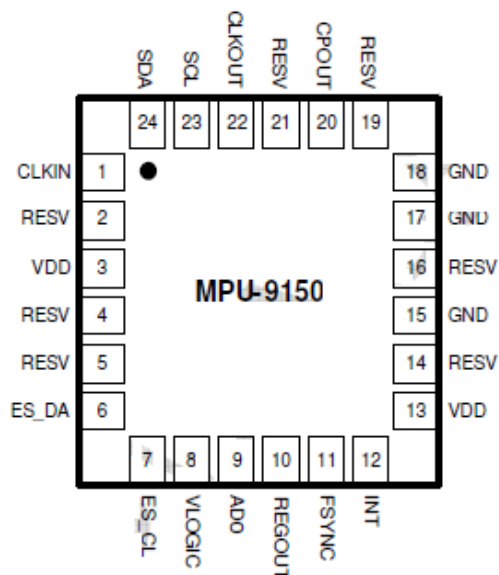


Figura 35: Pinagem do dispositivo MPU-9150 [48]

| Número do Pino | Mnemônico | Descrição  |
|----------------|-----------|--|
| 1              | CLKIN     | Referência externa opcional ao clock de entrada. Conectado ao GND caso fora de uso |
| 6              | ES_DA     | Dados Serial I <sup>2</sup> C Auxiliar   |
| 7              | ES_CL     | Clock serial I <sup>2</sup> C serial   |
| 8              | VLOGIC    | Fonte de energia de entrada/saída digital  |
| 9              | AD0       | Endereço do bit menos significativo do I <sup>2</sup> C                            |
| 10             | REGOUT    | Conexão para filtro capacitivo regulador   |

|                         |        |  |
|-------------------------|--------|--|
| 11                      | FSYNC  | Entrada digital de sincronização de quadros. Conectado ao GND caso fora de uso |
| 12                      | INT    | Saída digital de interrupção   |
| 3, 13                   | VDD    | Tensão de alimentação e entrada/saída digital da tensão de alimentação         |
| 15, 17, 18              | GND    | Terra  |
| 20                      | CPOUT  | Carga da conexão capacitiva  |
| 22                      | CLKOUT | Saída do sistema de clock  |
| 23                      | SCL    | Clock serial I <sup>2</sup> C  |
| 24                      | SDA    | Dado serial I <sup>2</sup> C   |
| 2, 4, 5, 14, 16, 19, 21 | RESV   | Pinos não conectados   |

**Tabela 6: Terminais do dispositivo MPU-9150 [48]**

Esse sensor foi projetado para ser possível adicionar múltiplos sensores não inerciais, como por exemplo o sensor de pressão barométrico, utilizando as portas I<sup>2</sup>C auxiliares (pinos 7 e 8 do MPU-9150) e assim produzindo uma saída com 10 parâmetros diferentes. Ligado dessa maneira, o MPU-9150 faz a aquisição dos dados dos sensores auxiliares, permitindo que o processador interno (indicado pelo bloco Digital Motion Processor na figura 36) execute a fusão de dados sem intervenção do processador principal da placa, para quem os dados são enviados pela saída SDA no projeto.

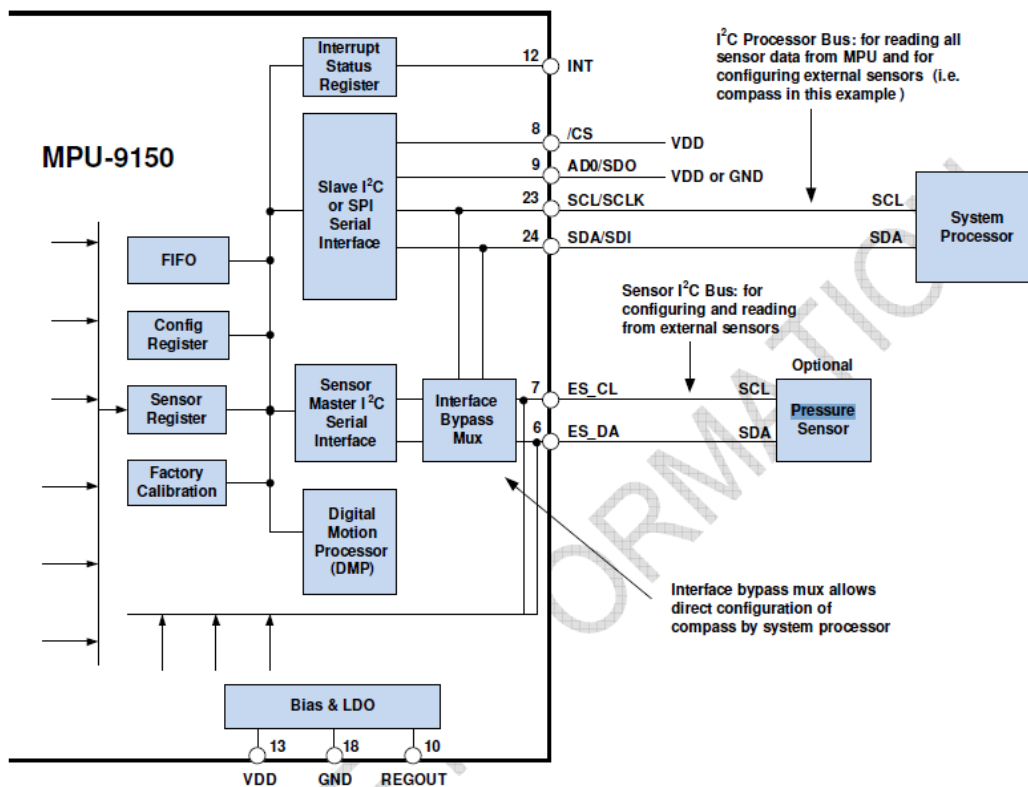


Figura 36: Diagrama de blocos do MPU-9150 [48]

Na Figura 37 e Tabela 7 estão os dados do *layout* do MPU-9150 para criação do *footprint* para ser adicionado à placa de circuito impresso.

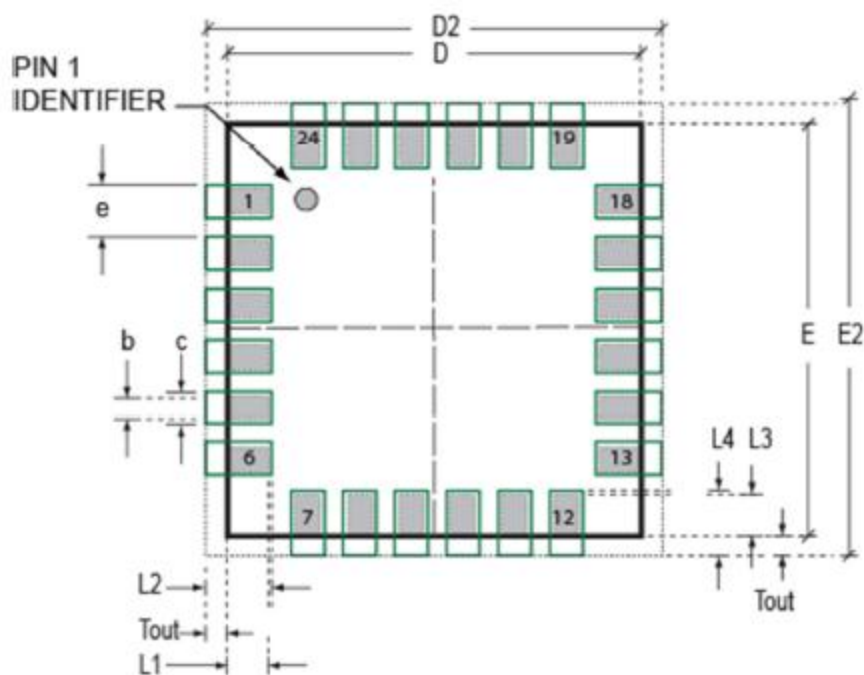


Figura 37: Layout do Rastreador de movimento MPU-9150 para placa de circuito impresso [48]



| <b>Símbolo</b> | <b>Medida (mm)</b> |
|----------------|--------------------|
| e              | 0,50               |
| b              | 0,25               |
| L1             | 0,35               |
| L3             | 0,40               |
| D              | 4,0                |
| E              | 4,0                |
| D2             | 4,80               |
| E2             | 4,80               |
| c              | 0,35               |
| L2             | 0,80               |
| L4             | 0,85               |

**Tabela 7: Medidas do dispositivo MPU-9150 [48]**

### **3.3 Diagrama de blocos da nova placa que será desenvolvida**

Na Figura 38, pode ser visto com mais clareza por meio do diagrama de blocos como será montada a nova placa do controlador do VANT, bem como será a conexão e o modo de comunicação entre os microcontroladores e os dispositivos (Sensores de pressão barométrica e diferencial, rastreador de movimento e GPS).

Além dos sensores, é visto também a disposição dos pinos de entrada para os sinais do rádio controle e as saídas para os motores servos ou ESCs.

A alimentação da placa de circuito impresso é feita utilizando um dos BECs conectados no bloco OUT PWM que também alimenta um dos motores servos utilizados no voo da aeronave. Para isso, há um fusível de proteção entre a conexão +5V do BEC e o restante do circuito da placa de 500mA, uma vez que o consumo de corrente do controlador é inferior a 300mA e cada ESC ou servo-motor utilizado pode ter picos de algumas unidades de Amperes durante o voo.

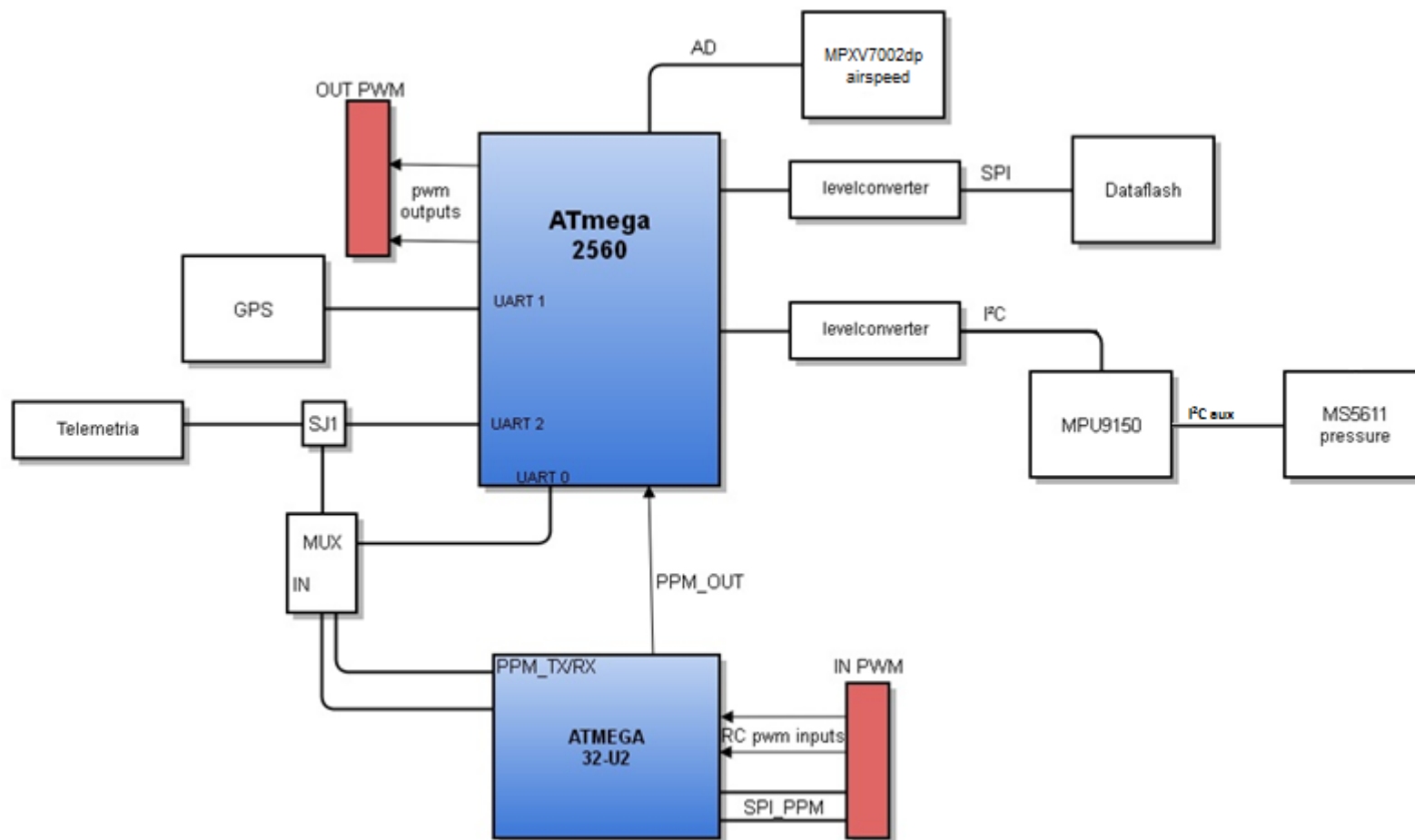


Figura 38: Diagrama de contendo os componentes da nova placa do controlador que será montado.

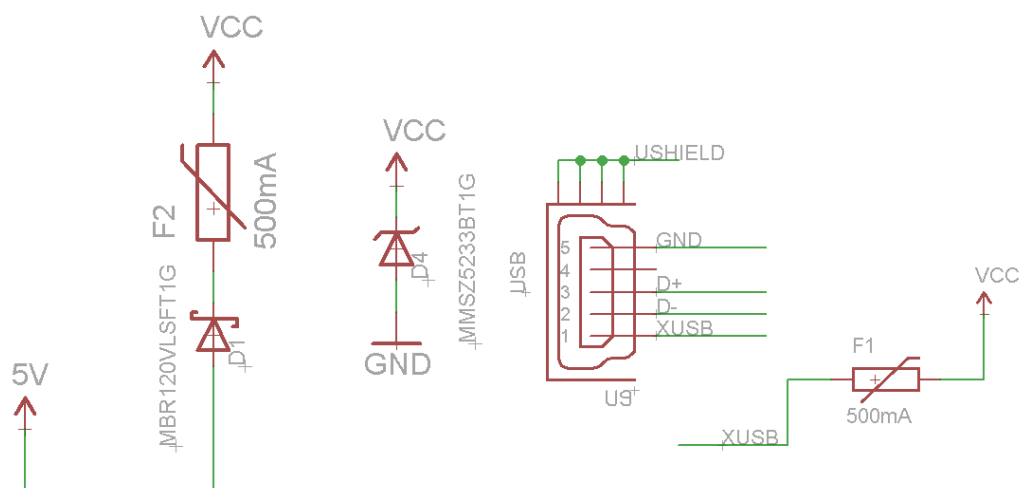
### 3.4 Conexão dos componentes

Nesta sessão serão abordados como foi realizada a conexão entre os componentes previamente descritos e as novas conexões em relação à placa de circuito impresso do ArduPilot e em adicional como será feita a alimentação da nova placa.

Todos os modelos do esquemático da nova placa (*schematic*) foram realizados utilizando o *software* de *design* para *layout* de placas de circuito impresso EAGLE [34]. O Eagle é um software gratuito bastante utilizado pela comunidade e foi escolhido para possibilitar o compartilhamento do projeto com a comunidade de desenvolvedores do Ardupilot, que também empregam o Eagle nos seus desenvolvimentos.

#### 3.4.1 Alimentação

Para a devida proteção do circuito, o circuito indicado pela Figura 39 foi projetado.

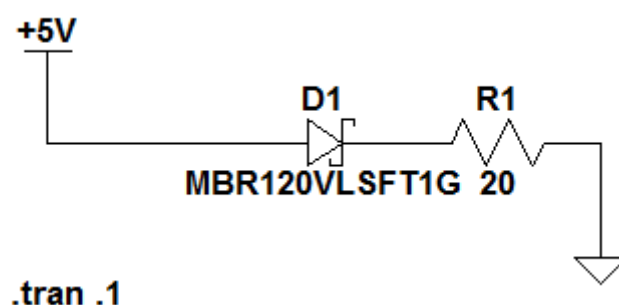


**Figura 39: Circuito de alimentação da placa de circuito impresso**

A alimentação pode ser feita por meio de uma bateria ou utilizando um dos BECs com tensão de saída no valor de 5V. A consumo de corrente total de todos os sensores e microcontroladores é de no máximo 300mA, por isso foi utilizado o fusível F2 no valor de 500mA como proteção caso por algum motivo inusitado ocorra.

A trilha denominada por 5V na Figura 39 é onde serão ligados os servomotores ou os ESCs, que são os dispositivos que consomem um alto valor de corrente elétrica se comparados com o restante da placa. O diodo D1, tem a sua tensão de polarização reversa no valor de 20V e ele tem a função de não deixar passar corrente de VCC para 5V nos casos em que a placa é alimentada pela conexão USB, que se liga diretamente a VCC.

Como a passagem de corrente pelo diodo D1 implica em uma pequena queda de tensão, este por não ser um curto circuito ideal em sua polarização direta, foi realizada a seguinte simulação indicada pela Figura 40. Esta simulação foi realizada com o auxílio do software LTSpice IV.



**Figura 40: Circuito para simulação da queda de tensão em D1**

De acordo com a Figura 41, pode ser observado que para o consumo de corrente médio da placa de circuito impresso, há uma queda de tensão de 0,3 volts. Isso poderá afetar o perfeito funcionamento de alguns dos componentes. Para resolver esse problema, o ideal é que o BEC que irá alimentar a placa possua uma tensão de saída no valor de 5,3 volts.

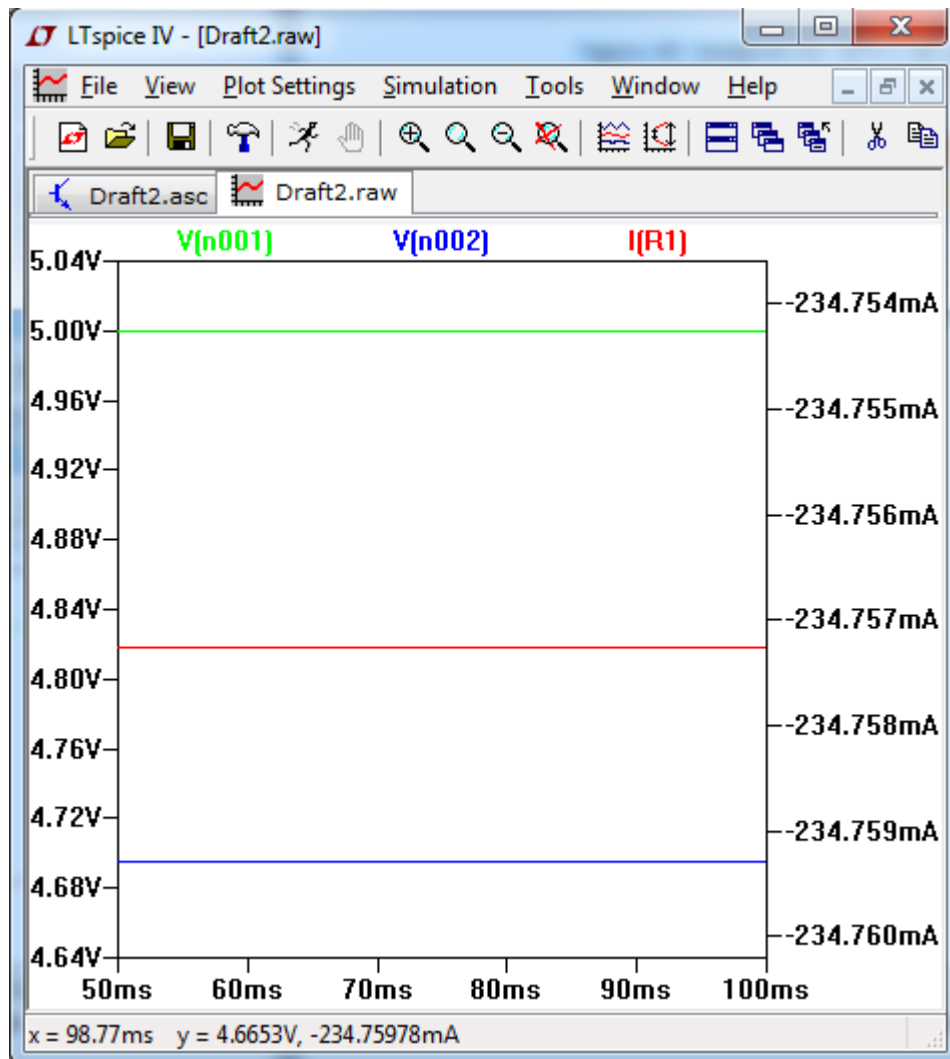
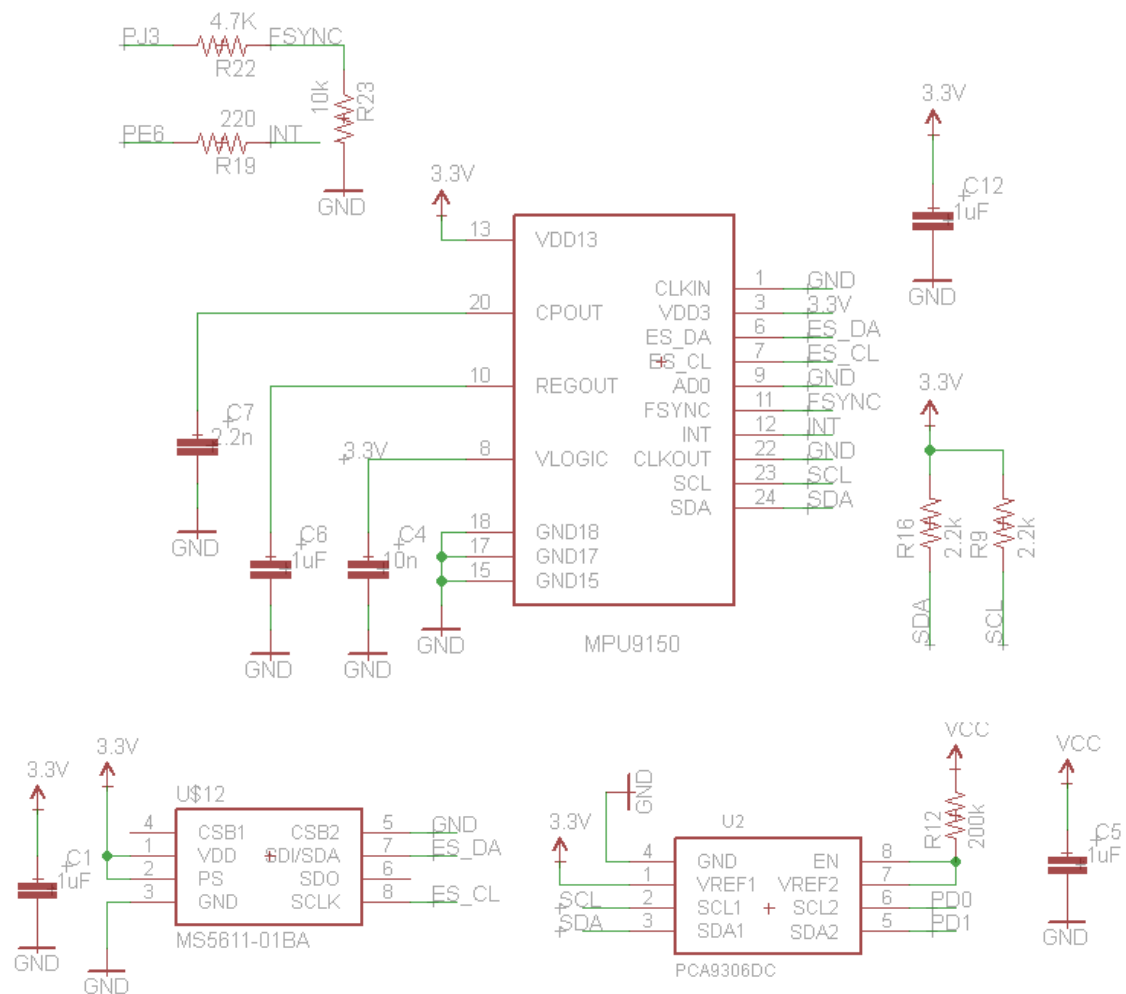


Figura 41: Resultado da simulação do circuito da figura 43

O diodo D4 é um diodo regulador no valor de 6V.

### 3.4.2 MPU-9150 e sensor de pressão barométrico MS5611

A Figura 42 mostra como foram feitas as ligações entre os sensores MPU-9150 e MS5611 em conjunto com o microcontrolador Atmega 2560



**Figura 42: Diagrama da conexão feita entre os sensores MPU-9150 e MS5611 com o microcontrolador**

Para as devidas conexões, foi utilizado como base o diagrama da Figura 38. De acordo com o diagrama, as conexões são realizadas da seguinte maneira: sensor de pressão nos terminais 7 e 8 e o rastreador de movimento nos terminais 6 e 7, de modo que o rastreador de movimento MPU9150 passe a ter em sua saída 10 diferentes parâmetros.

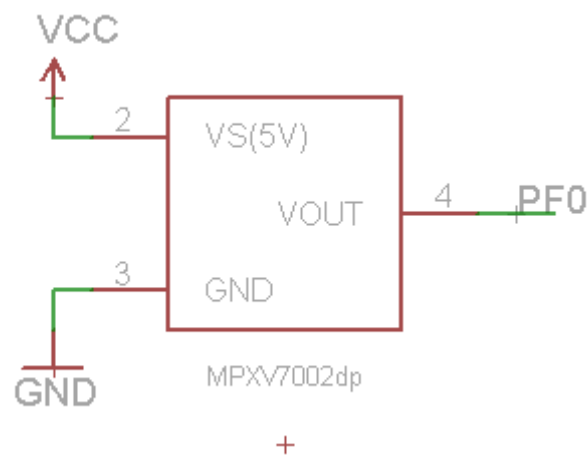
A comunicação entre o rastreador e o microcontrolador Atmega 2560 é feita através do sistema I<sup>2</sup>C. Para realizar esta conexão, foram utilizados os terminais já designados para isso no microcontrolador PD0 (terminal 43, SCL) e PD1 (terminal 44, SDA).

Devido ao sinal no microcontrolador possuir a amplitude do nível alto de tensão elétrica no valor de 5V e os sensores possuírem o nível alto de tensão elétrica no valor de 3,3V, foi utilizado o componente PCA9306DC (indicado como levelconverter na

Figura 38) que possui a função de transladar bidirecionalmente o nível de tensão de 3,3V para 5V e de 5V para 3,3V.

### 3.4.3 Sensor de pressão diferencial MPXV7002dp

A conexão dos terminais do sensor de pressão diferencial foram feitas de acordo com a Figura 43.

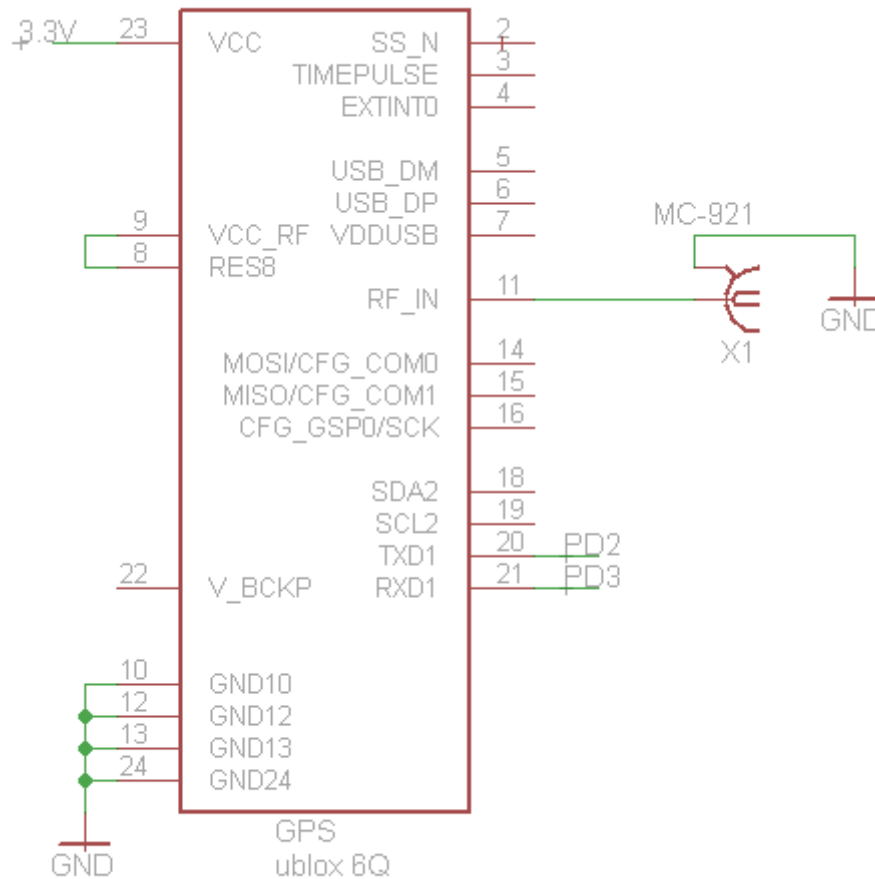


**Figura 43: Conexão dos terminais do sensor de pressão diferencial MPXV7002dp**

O terminal de saída do sensor de pressão diferencial ( $V_{OUT}$ ) foi ligado a PF0 (terminal 97, ADC0) que é um dos terminais designados para conversão analógico digital do microcontrolador.

### 3.4.4 GPS u-blox 6Q

As conexões entre os terminais do GPS u-blox 6Q foram feitas de acordo com o *schematic* indicado pela Figura 44.



**Figura 44: Schematic das conexões do GPS u-blox 6Q**

A comunicação entre o GPS e o microcontrolador pelo protocolo de comunicação UART faz as conexões entre os terminais Tx (transmissor) com o terminal Rx (receptor) entre os componentes. No GPS, o terminal 20 (TXD1) está conectado ao terminal 45 (PD2, Rx da interface UART1 do microcontrolador) e o terminal 21 (RXD1 do GPS) está conectado ao terminal 46 (PD3, Tx do microcontrolador).

Para aquisição dos dados do GPS, o terminal 11 (RF\_IN) está conectado a uma antena.



## 4. RESULTADOS

O resultado mais relevante do trabalho consiste no projeto da placa impressa. Para isso, o *footprint* dos componentes em que foram realizadas as principais modificações em relação ao projeto utilizado como base estão nas Figuras 45, 46, 47 e 48.

Esses circuitos foram montados de acordo com os diagramas esquemáticos (*schematics*) desenvolvidos na seção 3.4.

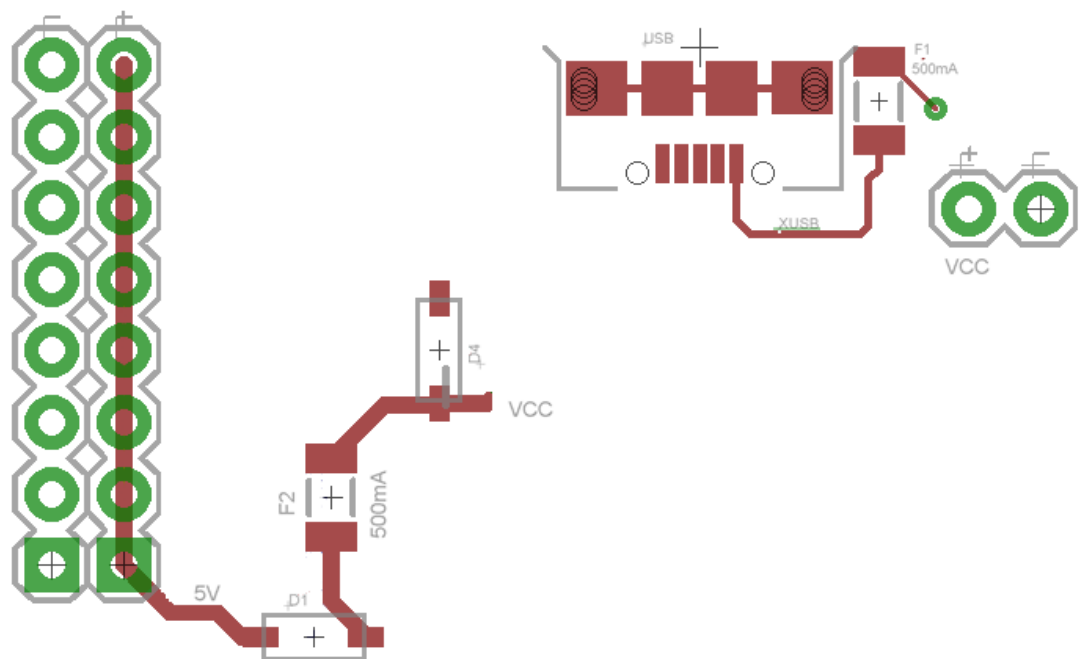
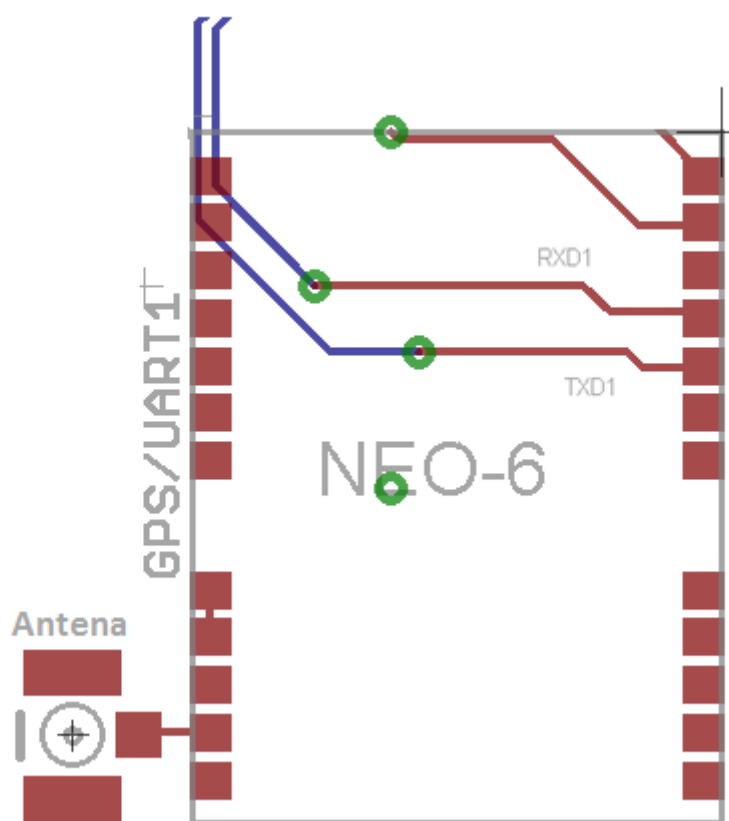


Figura 45: Alimentação da placa de circuito impresso





**Figura 48: *footprint* do GPS e da antena com as conexões para o microcontrolador**

A placa de circuito impresso completa, em conjunto com o *schematic* de todo o projeto podem ser observados nos Apêndices A e B no final deste trabalho.



## 5. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que foi realizado o desenvolvimento o projeto de um novo hardware para utilização do controle em veículos aéreos não tripulados utilizando sensores mais modernos e a integração de novos sensores à própria placa de circuito impresso. Vale ressaltar que a placa pode ser utilizada para controlar outros tipos de veículos, como por exemplo para robôs terrestres (*Rovers*). São estes inclusive os mais interessantes para realizar os primeiros testes, uma vez que são veículos terrestres a chance de danificar a placa em caso de erros é menor.

Esta nova versão da placa preservou o processador original de 8 bits, apesar deste já estar bastante sobrecarregado com a execução dos algoritmos de controle de navegação implementados pelo Ardupilot. Essa estratégia permite que a inclusão dos novos sensores sejam testadas com o mínimo possível de alterações no software. Uma vez que a inclusão dos novos componentes se mostre eficiente e segura, é proposto que a nova versão da placa seja implementada com um processador ARM de maior capacidade.

Devido à complexidade da placa e ao fato do EAGLE não possuir um algoritmo otimizado para rotear a placa automaticamente, foi necessário fazer o roteamento manual de toda a placa de circuito impresso, de modo a gerar resultados mais satisfatórios. No entanto, o EAGLE oferece um excelente suporte para realizar o roteamento manual.

Além do roteamento manual, o EAGLE permitiu criar os *footprints* dos novos sensores em sua interface e estes então puderam ser adicionados à biblioteca do mesmo.

Devido aos elevados custos de fabricação, foram necessárias várias horas de verificação pois caso ocorra algum erro, será muito caro refazer a placa. Além disso, caso ocorra um erro, durante o voo do VANT poderá ocorrer alguma falha e isso causar um acidente.

Na seção 5.1 estão indicados alguns projetos futuros para dar continuidade ao trabalho.

### 5.1 Trabalhos Futuros

- Confecção do projeto da placa de circuito impresso;

- Reprogramação do software atual para adequar o microcontrolador aos novos sensores e às novas conexões realizadas, enfatizando o rastreador de movimento que utiliza o protocolo de comunicação I<sup>2</sup>C enquanto o antigo giroscópio utilizava o protocolo SPI;
- Testes da nova placa já reprogramada com os VANTs desenvolvidos no LCR-ICMC-USP.
- Reprojetado da placa com um processador ARM de maior capacidade.
- Reprojetado e extensiva revisão do software para a inclusão de um sistema IFA (In-Flight Awareness) de proteção em tempo real de voo para prevenir acidentes e quedas.

## Bibliografia

- [1] “The Rise of the Predator Empire: Tracing the History of U.S. Drones.” [Online]. Available: <http://understandingempire.wordpress.com/2-0-a-brief-history-of-u-s-drones/>.
- [2] “States are competing to be the Silicon Valley of drones.” [Online]. Available: <http://www.washingtonpost.com/blogs/the-switch/wp/2013/08/19/states-are-competing-to-be-the-silicon-valley-of-drones/>.
- [3] “Andreas Raptopoulos: No roads? There’s a drone for that.” [Online]. Available: [http://www.ted.com/talks/andreas\\_raptopoulos\\_no\\_roads\\_there\\_s\\_a\\_drone\\_for\\_t](http://www.ted.com/talks/andreas_raptopoulos_no_roads_there_s_a_drone_for_that) hat.
- [4] “The ArduPilot Mega Hardware.” [Online]. Available: <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/Hardware>.
- [5] “Unmanned aerial vehicle.” [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned\\_aerial\\_vehicle#cite\\_note-nytimes-2](http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle#cite_note-nytimes-2). [Accessed: 10-Nov-2001].
- [6] “A small UAV photographs in detail the nuclear plants of Fukushima.” [Online]. Available: <http://uav-aerial-photo.com/aerial-photo-uav-nuclear-plants-fukushima-japan.html>.
- [7] “Ararinha.” [Online]. Available: [http://gisa.icmc.usp.br/site/?page\\_id=2797](http://gisa.icmc.usp.br/site/?page_id=2797).
- [8] “Servo Motor.” [Online]. Available: <http://www.engineersgarage.com/articles/servo-motor>.
- [9] “How to interface Servo Motor with PIC Microcontroller.” [Online]. Available: <http://www.engineersgarage.com/embedded/pic-microcontroller-projects/interface-servo-motor-circuit>.
- [10] “Aircraft Rotations.” [Online]. Available: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/rotations.html>.
- [11] J. D. A. Jr., *Introduction to FLIGHT*, Seventh. pp. 589 – 591.
- [12] “ardupilot-mega - Connecting your RC gear.” [Online]. Available: <https://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/APM2RC>.
- [13] “GPS system with IMUs tracks first responders.” [Online]. Available: [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1259727](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1259727).
- [14] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, *Fundamentos de Física I*, 4<sup>a</sup> ed. 1996, p. 274.

- [15] "Gyroscope." [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/gyr.html>.
- [16] "Next Generation of MEMS gyroscopes and inertial combo sensors from SensorDynamics," 2011. [Online]. Available: <http://www.i-micronews.com/news/Generation-MEMS-gyroscopes-inertial-combo-sensors-SensorDyn,6375.html>.
- [17] "Accelerometer." [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer>.
- [18] K. Sato, Y. Watanabe, C. Meyer, and Y. Papastamatiou, "Accelerometer Studies of Tiger Shark Swimming Behavior." [Online]. Available: <http://www.hawaii.edu/himb/ReefPredator/Accelerometer.html>.
- [19] S. A. Macintyre, "Magnect field measurement."
- [20] "Pressure sensor." [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure\\_sensor](http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_sensor).
- [21] M. E. Jensen, *Evapotranspiration and Irrigarion Water Requirements*. 1990.
- [22] J. Catsoulis, *Designing Embedded Hardware*. 2003, p. 268.
- [23] "Pitot tubes." [Online]. Available: [http://www.engineeringtoolbox.com/pitot-tubes-d\\_612.html](http://www.engineeringtoolbox.com/pitot-tubes-d_612.html).
- [24] J. Haringman, "Interpreting the GPS satellite tracker data," 2013. [Online]. Available: <http://www.solarracing.org/2013/10/06/interpreting-the-gps-satellite-tracker-data/>.
- [25] "Global Positioning System." [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System#Navigation\\_equations](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System#Navigation_equations). [Accessed: 22-Nov-2013].
- [26] N. Mahalik, *MEMS*. 2007.
- [27] "MEMS Accelerometers." [Online]. Available: <http://www.insensor.com/?id=sensors>.
- [28] "Using the I2C Bus." [Online]. Available: [http://www.robot-electronics.co.uk/acatalog/I2C\\_Tutorial.html](http://www.robot-electronics.co.uk/acatalog/I2C_Tutorial.html).
- [29] "Comunicação I2C." [Online]. Available: <http://microcontrolandos.blogspot.com.br/2012/12/comunicacao-i2c.html>.
- [30] "PCB trace." [Online]. Available: [http://www.hardwarebook.info/PCB\\_trace](http://www.hardwarebook.info/PCB_trace).
- [31] "Concepts and terminology used in Printed Circuit Boards (PCB)." [Online]. Available: <http://www.pcb.electrosoft-engineering.com/04-articles-custom->

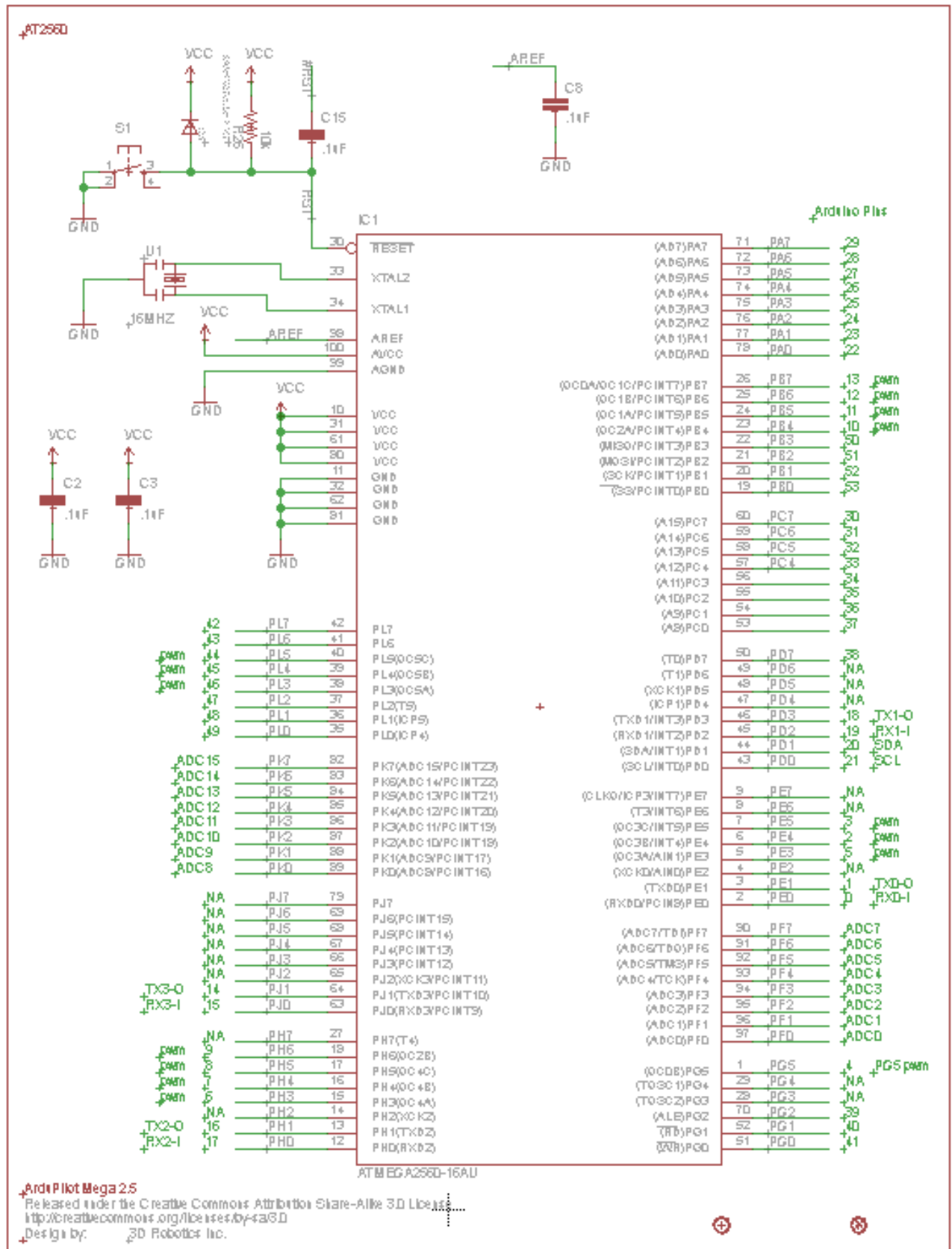


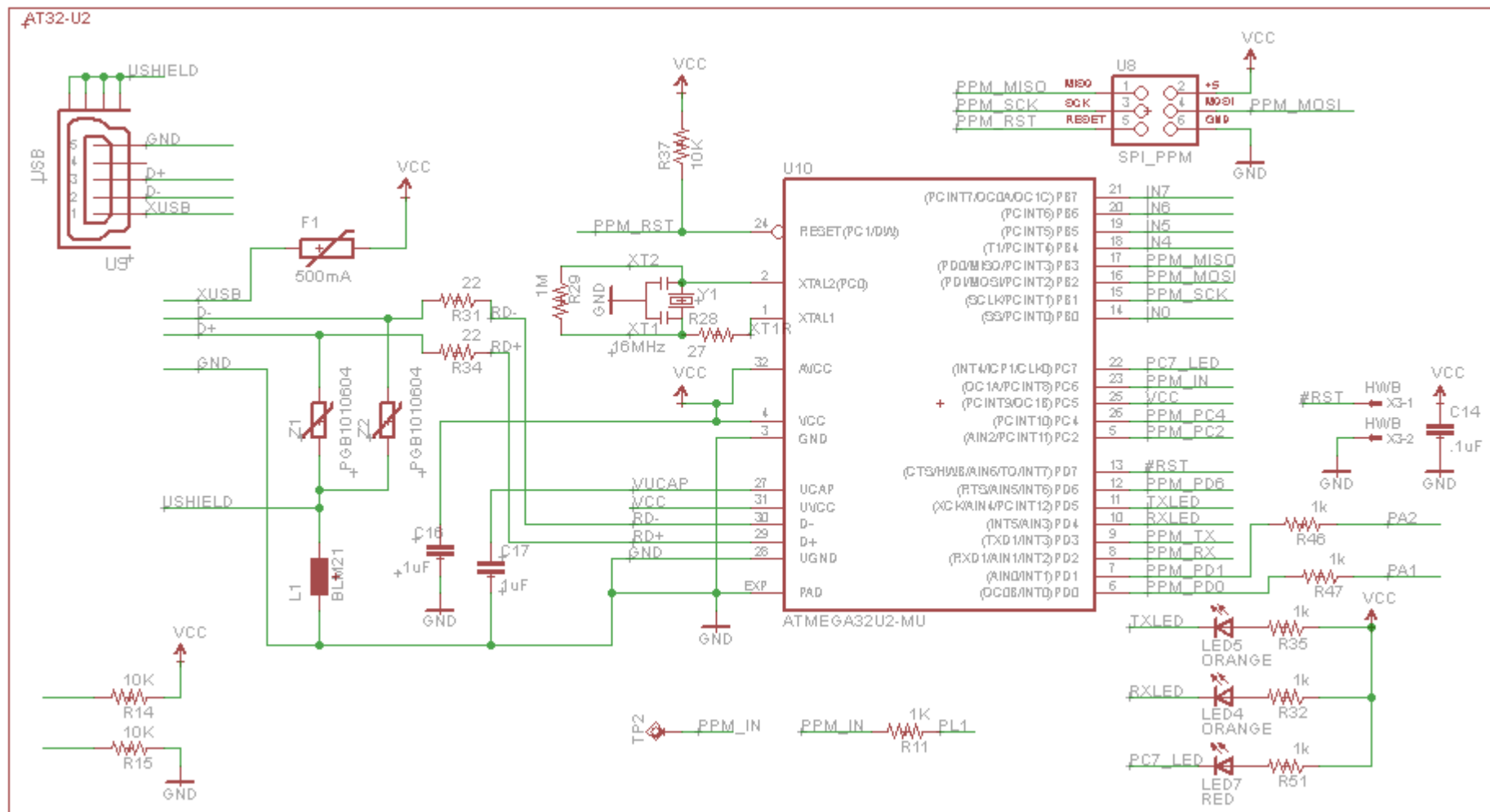
system-design-and-pcb/01-printed-circuit-board-concepts/printed-circuit-board-pcb-concepts.html.

- [32] "IPC (electronics)." [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/IPC\\_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/IPC_(electronics)).
- [33] "Generic Standard on Printed Board Design," 1998.
- [34] "EAGLE (program)." [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/EAGLE\\_\(program\)](http://en.wikipedia.org/wiki/EAGLE_(program)).
- [35] "ArduPilot Mega hardware." [Online]. Available: <https://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/HardwareDetails>.
- [36] "Introduction to Arduino." [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/Guide/Introduction>.
- [37] "ArduPilot/APM development site." [Online]. Available: <http://dev.ardupilot.com/>.
- [38] "APM 2.5+ Assembled." [Online]. Available: <http://store.3drobotics.com/products/apm-2-dot-5-plus-assembled-set-top-entry>.
- [39] "The Mission Planner utility." [Online]. Available: <https://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/Mission>.
- [40] "ATmega640/1280/1281/2560/2561 - Datasheet." 2012.
- [41] "APM 2.x Atmega 32U2 8 Channel PPM encoder." [Online]. Available: <http://copter.ardupilot.com/wiki/common-ppm-encoder-apm2x-atmega32u2/>.
- [42] "ATmega32u2." [Online]. Available: [http://momo-shin.cocolog-nifty.com/photos/uncategorized/2010/12/07/atmega32u2\\_1.jpg](http://momo-shin.cocolog-nifty.com/photos/uncategorized/2010/12/07/atmega32u2_1.jpg).
- [43] MEAS, "MS5611-01BA03 Barometric Pressure Sensor , with stainless steel cap - Datasheet." 2012.
- [44] "TSA23157 - Datasheet," 2008.
- [45] "DataFlash AT45DB161D - Datasheet." 2013.
- [46] "Freescale Semiconductor Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned , MPX7002 Series - Data Sheet." 2009.
- [47] "NEO-6 u-blox 6 GPS Modules - Data Sheet." 2011.
- [48] "InvenSense MPU-9150 - Data Sheet," vol. 1. 2012.

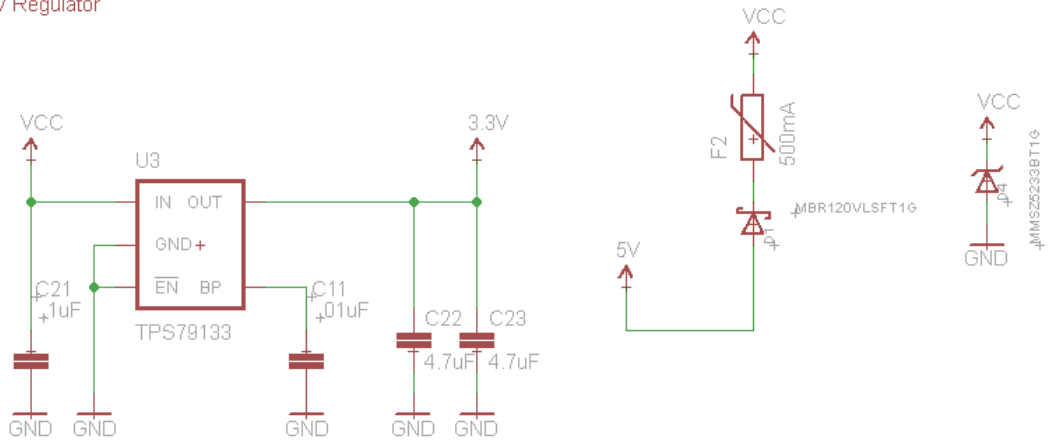


## Apêndice A – Schematic do projeto desenvolvido

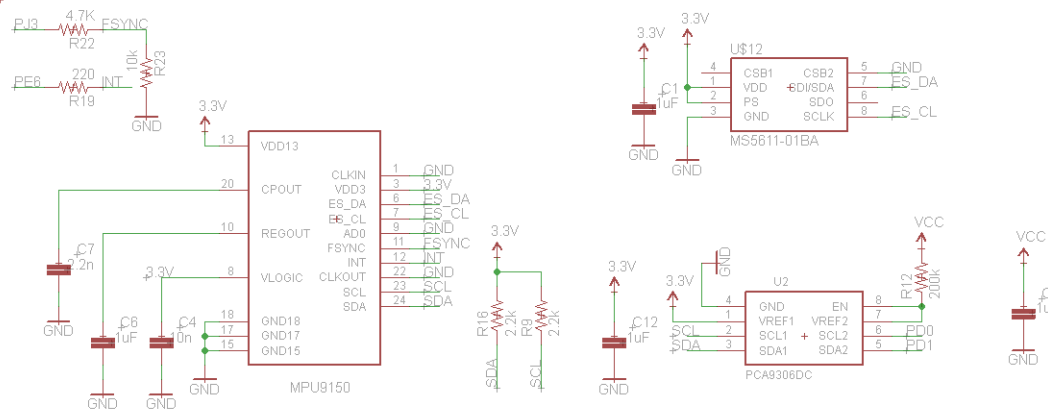




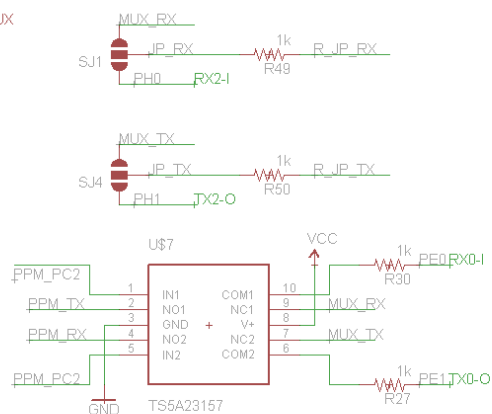
### 3.3V Regulator



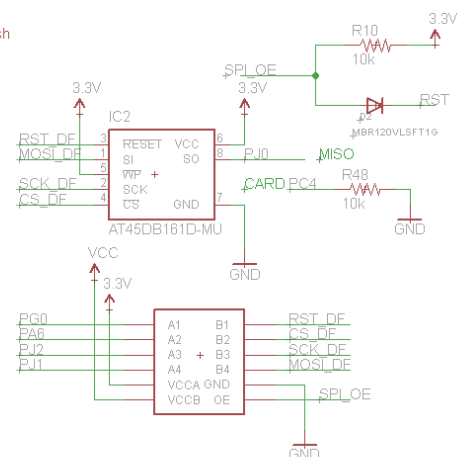
### MPU/Pressure



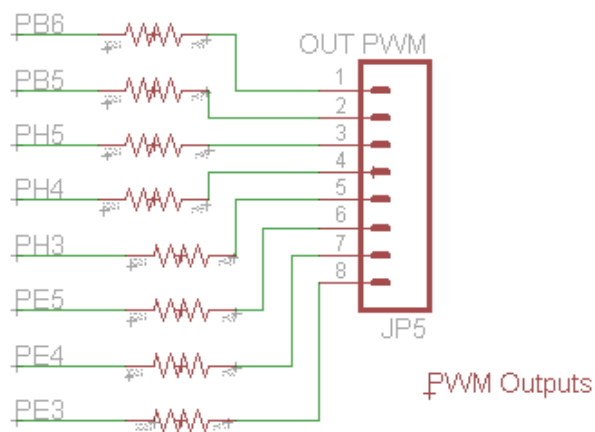
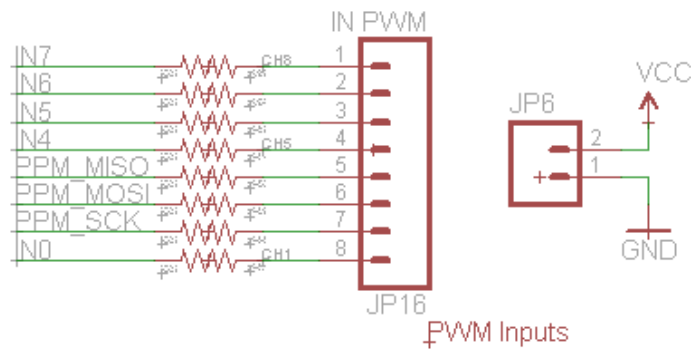
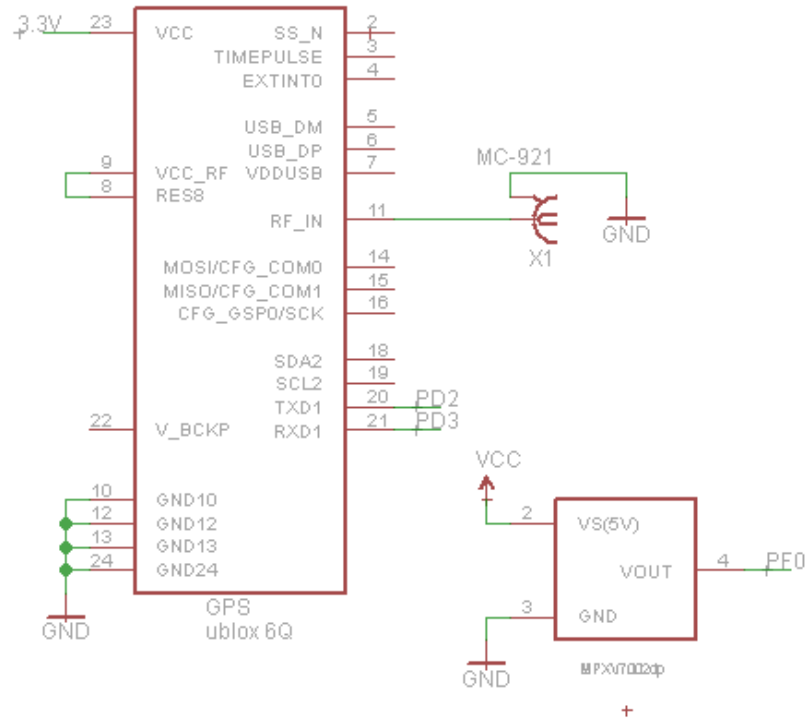
### MUX

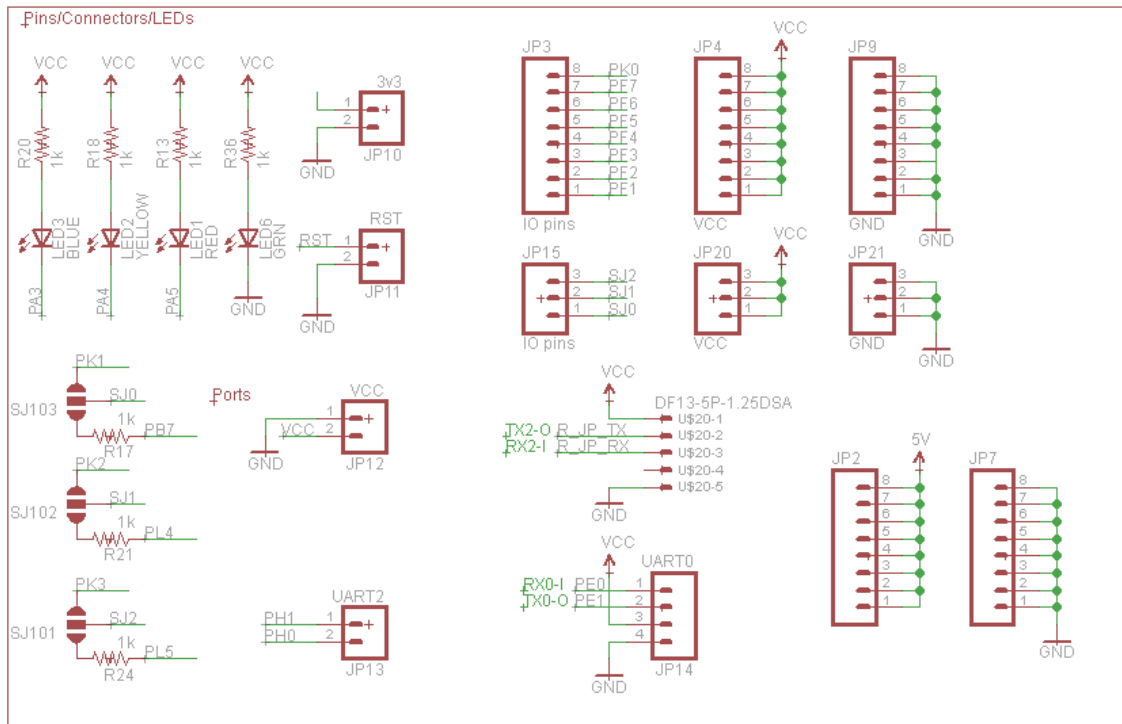


### DataFlash



# GPS/Pressao diferencial

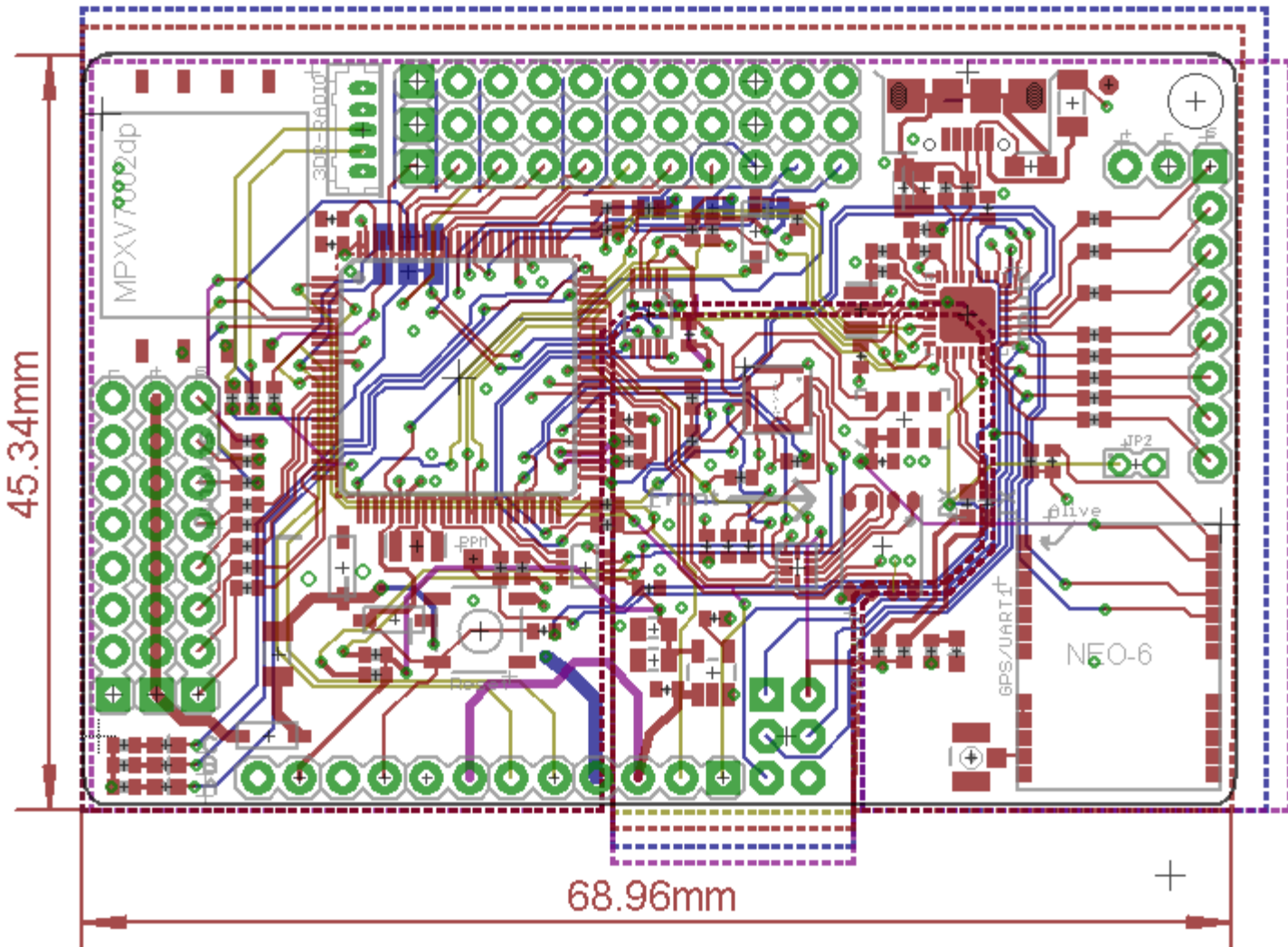








## Apêndice B – Placa do projeto desenvolvido





## Apêndice C –Dispositivos eletrônicos da placa desenvolvida

