



## **Treball de Fi de Grau**

# *Disseny i construcció d'un vehicle aeri no tripulat*

Alex Lara Linares i Gil Prat Pladevall

**Grau en Enginyeria Mecatrònica**

Tutor: Ramón Reig Bolaño

Vic, Setembre de 2016

# Agraïments

Volem expressar el nostre major agraïment a tota la gent que ens ha ajudat a arribar fins aquí, en especial a les nostres famílies i els professors que ens han impartit classe durant els quatre anys de grau. També volem agrair al tribunal la presència i valoració del nostre treball, i al nostre tutor per guiar-nos i aconsellar-nos en la confecció del treball. Volem agrair també a la universitat per l'ús del taller, i en especial al responsable del taller Jordi Serra per la seva ajuda i assessorament.

# Índex:

RESUM TREBALL FINAL DE GRAU EN MECATRÒNICA .....	6
SUMMARY .....	7
Capítol 1 .....	8
1.1. Introducció: .....	8
1.2. Objectius: .....	9
1.3. Planificació: .....	10
Capítol 2 - Estudi teòric .....	13
2.1. Que és un vehicle aeri no tripulat? .....	13
2.2. Tipus de vehicles aeris no tripulats? .....	13
2.3. Elecció del tipus de multi-rotors. ....	15
2.4. Normativa de vol a l'estat Espanyol. ....	18
Capítol 3- Disseny mecànic: .....	20
3.1. Cinemàtica dels moviments principals d'un hexacòpter: .....	20
3.2. Fonaments aerodinàmics: .....	21
3.2.1. Model matemàtic en estat estacionari: .....	21
3.2.2. Model matemàtic en ascens. ....	22
3.3. Disseny de l'estructura: .....	23
3.3.1. Materials de l'estructura: .....	23
3.3.2 Disseny de les peces. ....	27
3.4. Propietats mecàniques de l'estructura .....	36
3.4.1 Distribució de masses: .....	36
3.4.2. Pes de l'estructura dissenyada: .....	38
3.5. Càlcul de resistència de les peces. ....	38
3.5.1. Conceptes basics d'utilització del programa: .....	39
3.6. Confecció de l'estructura: .....	47
Capítol 4 - Electrònica del multicòpter.....	52
4.1 Elecció del material electrònic .....	52
4.1.1 Procediment d'elecció: .....	52
4.1.2 Esquema general del sistema: .....	52
4.2 Sistema de propulsió .....	53
4.2.1 Motors .....	53
4.2.2 ESC .....	57

4.2.3 Hèlixs .....	59
4.2.4 Connexionat sistema propulsió: .....	62
4.3 – Sistema d'alimentació .....	63
4.3.1 – Bateria .....	63
4.3.2 – Mòdul de potència .....	68
4.3.3 – BEC.....	69
4.4 – Sistema de control.....	70
4.4.1 – Controlador .....	70
4.5 – Sistema de comunicació controlador – pilot.....	81
4.5.1 – Emissora .....	81
4.5.2 –Telemetria .....	88
4.6 – Sistema d'imatge .....	90
4.6.1 FPV (First Person View – Visió en primera persona) .....	90
4.7. Pes total part electrònica .....	97
4.8. Comprovació del sistema. ....	98
Capítol 5 - Programació de la placa controladora.....	100
5.1. Programa per configurar el multicòpter: .....	100
5.2. Configuració bàsica: .....	100
5.3. Calibratge acceleròmetre:.....	102
5.4. Calibratge de la brúixola.....	103
5.5. Calibratge ESC. ....	104
5.6. Mode de seguretat:.....	105
5.6.1. Mode de seguretat en fallada de l'emisor: .....	105
5.6.2. Mode de seguretat de fallada de bateria:.....	106
5.6.3. Fallada de seguretat DCM/EKF.....	107
5.7. Calibratge emissora.....	108
5.8. Modes de vol.....	108
5.9. Configuració Gimbal.....	110
5.10. Configuració MicroOSD.....	111
5.11. Mòdul de potència .....	111
Capítol 6 - Galeria del muntatge .....	113
6.1. Pes total del sistema. ....	117
Capítol 7 - Costos.....	118
Capítol 8 - Milliores .....	121



Conclusions: .....	123
Bibliografia .....	125
ANNEX .....	127
ANNEX 1: Normativa de vol a l'estat espanyol .....	128
ANNEX 2: Plànols de l'estructura .....	136
ANNEX 3: Càlcul de la potència requerida pels motors .....	146
ANNEX 4: Manual d'usuari .....	148
ANNEX 5: Ficha tècnica alumini6060 .....	152
ANNEX 6: Electrònica .....	154
6.1 Connexió ESC.....	154
6.2 Normativa freqüències ISM.....	155
6.3 Control PID en UAV .....	158
6.3 Especificacions Pixhawk .....	164
6.4 Taula especificacions motors. ....	167
6.5 Especificacions ESC.....	168
6.6 Guia Telemetria .....	169
6.7 Datasheet GPS NEO-M8. ....	174
6.8 Datasheet Transmissor FPV.....	179
6.9 Datasheet ulleres FPV. ....	182
6.10 Enllaç transmissor-receptor. ....	184

# RESUM TREBALL FINAL DE GRAU

## GRAU EN MECATRÒNICA

**Títol:** [\*Disseny i construcció d'un Drone\*](#)

**Paraules clau:** *Drone, dron, multicòpter, UAV, VANT, FPV, gravació, fotografia aèria*

**Autors:** Alex Lara i Gil Prat

**Tutors:** Ramón Reig Bolaño

**Data:** Setembre de 2016

En aquest Treball de Final de Grau s'ha plantejat un projecte al qual hem buscat solució com a enginyers. Un client necessita un drone amb unes característiques específiques i totalment flexible a noves integracions. Al ser tant específic, el crearem des de 0, tant disseny com sistema electrònic. El drone serà principalment destinat a gravació i fotografia, pel que hem dissenyat un sistema a través del qual el pilot podrà veure en tot moment la càmera, que estarà completament estabilitzada i es podrà inclinar des de l'emissora.

L'objectiu principal del projecte és a partir d'una recerca exhaustiva, seleccionar el millor tipus de drone que s'adeqüi a les necessitats del nostre client, intentant reduir el màxim possible el cost sempre respectant la qualitat, fiabilitat i seguretat de l'aparell. Posteriorment es farà la proposta de disseny i una tria dels components adequats.

Per tant, l'objectiu principal serà enllaçar la mecànica dissenyada i construïda amb tota l'electrònica i sistemes externs com el de FPV, fent que el drone funcioni i voli de manera estable i amb una autonomia acceptable.

Es poden tenir molts problemes derivats tant d'alimentació, connexió i que el sistema no estigui ben dissenyat ja sigui electrònicament, mecànicament o ambdós sentits. També les vibracions poden donar molts problemes així com els sistemes d'enviament de radiofreqüència (vídeo i telemetria).

El resultat del projecte ha set molt acceptable, tenim un multicòpter que vola de forma estable i amb una gran autonomia, ja fins aquí es tot un èxit, comptant que fer una estructura i dissenyar un sistema electrònic i de control desde 0 és molt complicat. A part d'això, el sistema de càmera funciona perfectament amb un alcanç en camp obert de 2kms i sense talls de vídeo, podent controlar dos eixos de l'estabilitzador de la càmera per poder-la girar en ple vol. També en tot moment rebem totes les dades i característiques del vol.

Hem estructurat el treball en 8 capítols, els dos més importants són el 3 que inclou tota la part de mecànica i el 4 que és tota la part d'electrònica.

En quant al treball personal, en Gil Prat s'ha encarregat de tota la part mecànica (capítol 3) i l'Alex Lara s'ha encarregat de tot el sistema electrònic del drone (capítol 4), els altres capítols han estat confeccionats a parts iguals pel dos, els quals no es poden partir ja que contenen feina comuna i dels dos. Tot i fer cadascú una part, per tal de que tot el sistema treballés conjuntament hi ha hagut consens en totes les decisions per saber si tot era compatible.

El muntatge tant de mecànica i electrònica s'ha fet conjunt al taller ja que és més ràpid i còmode i per determinades feines és necessari la col·laboració de dos persones.

## SUMMARY

**Title:** *Design and assembly of a drone*

**Keywords:** *Drone, multicopter, UAV, FPV, video report.*

**Authors:** Alex Lara & Gil Prat

**Tutor:** Ramón Reig Bolaño

**Date:** September 2016

In this Final project we have a project which we have to resolve as engineers. A customer needs a drone with specific characteristics and totally flexible for future integrations. Because of its specificity, we will create it from 0, all the design and electronic system. This drone will be mainly designed to record video and photography, so we have designed a system which will allow to pilot seeing the video all the time and also control camera stabilizer from radio controller.

Main purpose of this project is to do an exhaustive research and after that selecting the best drone type, that will fit our customer needs, ever trying to reduce as much as possible the costs, respecting quality, reliability and security. After that design purpose will be done and also components will be chosen.

In short, our main purpose will be to link mechanics with electronic parts and all external systems like FPV (first person view), being sure that our drone works and flies in a stable way and with a good autonomy.

In this project a lot of problems can appear, mainly derived from power supply, connections and also due to bad electronic or mechanic design. Vibrations can also give us a lot of problems, also RF systems (video and telemetry).

Result of this project has been very acceptable, we have a multicopter flying in stable mode and with a great autonomy, this is a success but moreover, FPV system works perfectly with a good reach, about 2kms in open field and without video outages. We are able to control two cam stabilize axis so we can rotate our cam during flight.

We have structured our work in 8 chapters, the most important are two, third that includes all mechanical part and fourth that includes all electronic part.

Related to personal work, Gil Prat has been responsible of all mechanical part (chapter 3) and Alex Lara has been responsible of all electronic part (chapter 4), other chapters have been done in equal part and can't be split because they have common work. Although having done different parts each one, all decisions have been approved by both.

Drone assembly, both mechanical and electronic part has been assembled jointly because it is quicker and comfortable and depending the assembly part it is necessary two person, for example, the undercarriage.

# Capítol 1

## 1.1. Introducció:

Amb l'avanç de la tecnologia, els últims anys s'han fet molt populars els UAV (vehicles aeris no tripulats), la forma més coneguda avui en dia quan es parla de drone és la d'un còpter. Aquest concepte no es limita només a aquesta visió que es té sinó que hi ha una gran varietat de UAV. Sembla que siguin un invent recent però en realitat van sorgir de necessitats que els militars tenien.

Els orígens diuen que es van començar a fer servir per guiar míssils i inclús fer proves de naus sense tripulació per posteriorment ser tripulades.

El concepte militar ha set substituït per recreatiu i utilitari i avui en dia tenim naus que tenen infinitat d'usos, això ha fet que sorgeixi un sector professional dedicat a aquest tipus de vehicles.

El fet de que es comercialitzin sense cap control ni llicència, ha fet que els governs hagin hagut de regular el vol d'aquests vehicles en zones urbanes i crear lleis per tal d'evitar possibles accidents.

Com a enginyers i curiosos que som, ens va sorgir l'interès per a aquest tipus de tecnologia i veient que a la universitat s'havien intentat diferents projectes relacionats, vàrem voler fer un drone sòlid i destinat a la fotografia i gravació, ja que és un tema que també ens interessa molt. Unir tots aquests sistemes en un drone i poder integrar-ho tot era el nostre repte.

Hem volgut plantejar el treball com a possible projecte d'enginyeria, tenim una planificació prèvia i un cost de recursos, òbviament també comptant el cost de material. Un client té la necessitat d'un UAV amb unes característiques determinades i personalitzat, en primera instància es fa un prototip el qual es podrà reproduir per fer una flota, veurem si segons el cost ens surt a compte les hores invertides o pel contrari és millor comprar un RTF (ready-to-fly), sempre haurem de tenir en compte que volem un sistema tant flexible com es pugui per poder dur a terme diferents aplicacions.

Un dels obstacles més complicats del projecte és poder enlairar un drone amb una estructura dissenyada de 0 i una electrònica escollida a peces, segons el sistema i les nostres necessitats.

## **1.2. Objectius:**

En aquest treball de fi de grau, es té com a objectius el disseny i la fabricació d'un vehicle aeri no tripulat, que com a característiques principals es busca una gran estabilitat en el vol, ja que aquest vehicle es farà servir per a la gravació d'imatges, i també com a part important la possibilitat d'enlairar-se directament des de terra.

Es plantegen una sèrie de característiques bàsiques les quals hauran de ser complertes segons l'acord amb el client:

Concepte	Requisits
Funció	-Gravació de zones inaccessibles per l'usuari. -Radi i altura de vol elevat. -Càrrega mínima de transport 1kg
Dimensions	-Apte per un transport fàcil
Alimentació	-Bateries
Materials	-Lleugers i resistents
Pes	-Pes inferior a 5Kg
Control	-Per emissor de radiofreqüència -Des de un ordinador
Seguretat	-Ha d'incloure modes de seguretat davant de fallades
Fabricació	-S'ha de poder fabricar amb el material del taller de la universitat
Autonomia	-Superior a 10 minuts.
Impacte ambiental	-Mínim.

Taula 1. Requisits de disseny.

A part, com a complement interessa que el vehicle pugui realitzar tant funcions de pilot manual com funcions de pilot automàtic i tingui transmissió d'imatges a temps real. El repte principal és aconseguir tots els requisits amb un preu inferior el qual es podria trobar en el mercat un vehicle de les mateixes característiques tant de dimensions com de prestacions.

Els objectius també del disseny i fabricació del vehicle aeri no tripulat inclouen treballar diverses àrees d'enginyeria. Les més principals són: resistència de materials, tecnologia de materials, disseny assistit per ordinador, física mecànica i aerodinàmica, teoria de màquines, disseny de màquines, electrònica tant analògica com digital, programació per control numèric, apart de realitzar tot un projecte de disseny i producció d'un producte des de zero.

### **1.3. Planificació:**

Segons la proposta inicial del treball, es van planificar unes tasques a tenir en compte, vam decidir tenir-les controlades mitjançant un projecte.

Tasques inicials exposades:

**Setmana 1 – 2:** Confecció estudi previ complert, definició característiques definitives.

**Setmana 3 – 6:** Disseny estructural del dron (CAD, càlculs, ...), Disseny electrònic (motors, bateries, controladors, ...)

**Setmana 7:** Comanda de material i temporització de la construcció

**Setmana 8 - 9:** Construcció de l'estructura

**Setmana 10 – 14:** Programació controladora i test electrònic

**Setmana 15 – 17:** Assemblatge final, calibratge, proves de vol i conclusió de la memòria.

Tal i com es pot veure a continuació, hem intentat reflectir al màxim la feina i les tasques i de la manera més acurada possible:

N. Tasca	Nom de tasca	Duració	Inici	Fi	Predecessors	Nom dels recursos
1	Confecció proposta TFG	6 dies	dill 18/01/16	dill 25/01/16		
2	Presentació Proposta TFG	1 dia	dill 25/01/16	dill 25/01/16		
3	Confecció estudi previ, definició característiques	1,94 dies	dill 01/02/16	div 12/02/16	2	Enginyer 1;Enginyer 2
4	Disseny estructural i electrònic	3 dies	dill 15/02/16	div 11/03/16	3	Enginyer 1;Enginyer 2
5	Elecció i comanda de material	1,63 dies	dill 14/03/16	div 18/03/16	4	Enginyer 1;Enginyer 2
6	Construcció estructura mecànica	4,06 dies	dill 21/03/16	div 01/04/16	5	Enginyer 1;Enginyer 2
7	Muntatge electrònic, programació i test	8,13 dies	dill 04/04/16	div 06/05/16	6	Enginyer 1;Enginyer 2
8	Muntatge final, calibratge i proves de vol	5,19 dies	dill 09/05/16	div 27/05/16	7	Enginyer 1;Enginyer 2
9	Confecció de la memòria	85 dies	dill 01/02/16	div 27/05/16	2	

Taula 2. Planificació.

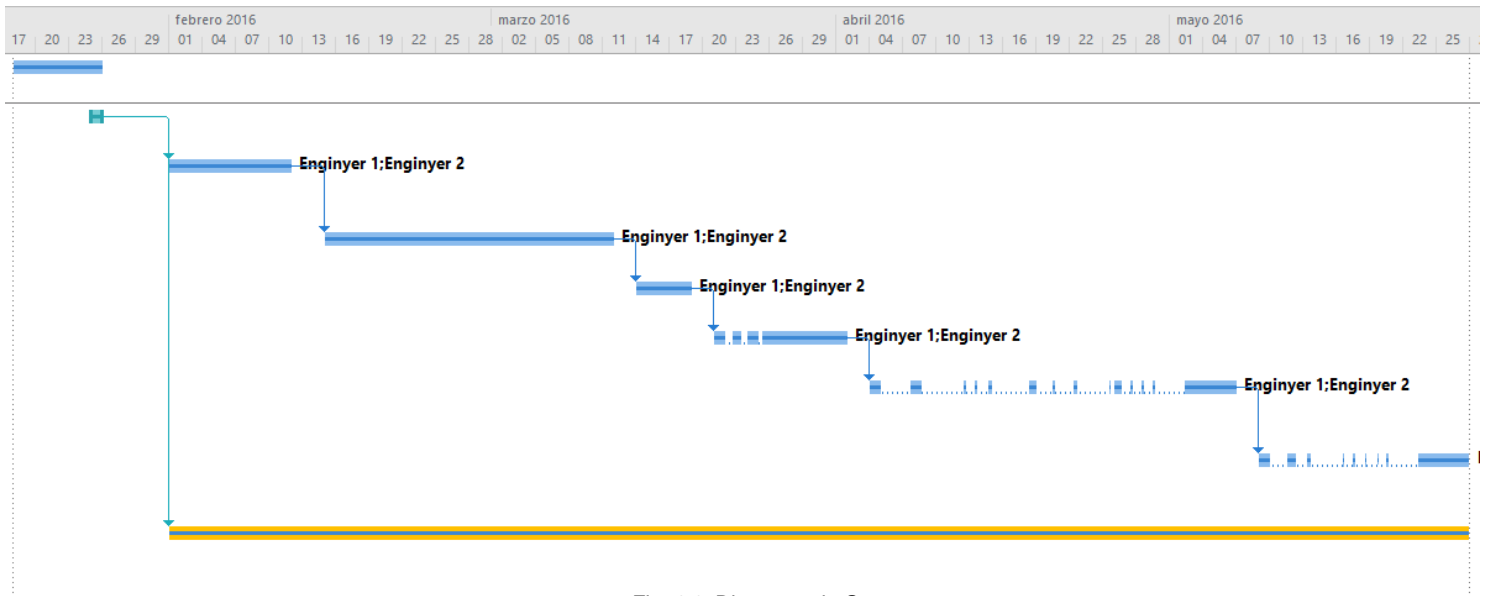


Fig. 1.1. Diagrama de Gantt.

Segons la planificació inicial tot estava planejat per entregar el projecte al juny, degut a retards causats pel termini d'entrega del material, tot es va endarrerir i consegüentment l'entrega del projecte.

Per tal d'ajustar el preu del projecte vam buscar materials de qualitat però el màxim ajustats qualitat / preu, això va fer que compréssim una part del material directament a Xina que és el major fabricant de peces de drones del mercat, com tot, trobem diferents games de producte i nosaltres vam buscar el màxim de qualitat.

Aquest endarreriment el podem veure reflectit a la planificació real del projecte:

N. Tasca	Nom de tasca	Duració	Inici	Fi	Predecessors	Nom dels recursos
1	Confecció proposta TFG	6 dies	dill 18/01/16	dill 25/01/16		
2	Presentació Proposta TFG	1 dia	dill 25/01/16	dill 25/01/16		
3	Confecció estudi previ, definició característiques	1,94 dies	dill 01/02/16	div 12/02/16	2	Enginyer 1;Enginyer 2
4	Disseny estructural i electrònic	3 dies	dill 15/02/16	div 11/03/16	3	Enginyer 1;Enginyer 2
5	Elecció i comanda de material	1,63 dies	dill 14/03/16	div 18/03/16	4	Enginyer 1;Enginyer 2
6	Construcció estructura mecànica	4,06 dies	dill 21/03/16	div 01/04/16	5	Enginyer 1;Enginyer 2
7	Muntatge electrònic, programació i test	8,13 dies	dill 25/04/16	div 27/05/16	6	Enginyer 1;Enginyer 2

8	Muntatge final, calibratge i proves de vol	5,19 dies	dill 30/05/16	div 24/06/16	7	Enginyer 1;Enginyer 2
9	Confecció de la memòria	85 dies	dill 01/02/16	div 05/09/16	2	

Taula 3. Planificació real.

Com es pot veure a la planificació anterior, tot va sobre el plantejament fins al muntatge electrònic en el qual ens faltaven peces per tal de poder començar-lo.

Tenim un endarreriment d'aproximadament 20 dies pel que fa a la recepció dels materials i posteriorment 1 setmana de retard a la tasca 8 referent al calibratge i proves de vol.



# Capítol 2

## Estudi teòric.

### 2.1. Que és un vehicle aeri no tripulat?

Un vehicle aeri no tripulat, o amb nom més comú dron, és una aeronau no tripulada. El fet de ser un vehicle no tripulat significa que no necessita cap persona que el controli des de el seu interior, per tant el vehicle ha d'estar tripulat a distància, amb radio control o similars, o bé estar programat per a no necessitar cap ordre externa per a realitzar completament la seva funció.

Inicialment els VANT van estar dissenyats per a ús militar ja que disminuïa el risc de la missió que aquest havia de realitzar al no posar en joc vides humanes. A mida que ha anat avançant la tecnologia, els drons s'han anat introduint en el mercat molt ràpidament, fins el punt d'arribar al consumidor per a l'ús personal d'entreteniment.



Fig. 2.1 Exemple de vehicle aeri no tripulat

### 2.2. Tipus de vehicles aeris no tripulats?

Com sabem, l'ús de els vehicles aeris no tripulats ha augmentat exponencialment en els últims anys. Per aquesta raó s'han creat molts tipus de VANT classificats per diversos patrons. Seguidament s'explicaran alguns dels més importants, en funció de la seva missió, tipus de control i abast majoritàriament.

En funció del tipus de missió es poden classificar per:

- Blanc: s'utilitzen per recrear i simular accions reals de vol, per tal de poder estudiar, o entrenar estratègies militars.
- Reconeixement: utilitzats per a reconèixer i estudiar espais on no es fàcil d'arribar. La informació és enviada a l'usuari a distància.

- Combat: s'utilitzen en missions perilloses en les quals es pot posar en perill la vida del pilot. Aquests vehicles poden anar armats i atacar blancs a distància.
- Salvament: utilitzats per a l'ús de rescat en zones de difícil accés o fins i tot amb perill per els equips de rescat.
- Transport: creats per a transportar càrrega.
- Recerca i desenvolupament: serveixen per a ajudar a realitzar proves de sistemes en desenvolupament.
- Comercials: són utilitzats principalment per a l'entreteniment. Molts dels vehicles que es venen per a l'ús comercial són utilitzats per a gravar imatges o realitzar fotos. Són els més econòmics i a hores d'ara els més utilitzats i fàcils d'aconseguir.

Els drons es poden classificar per el tipus de control:

- Autònom i adaptatiu: aquest és un tipus de vehicle aeri que no necessita cap tipus de control a temps real. A partir de sensors i software es capaç de adaptar-se a l'entorn i planificar de nou el seu vol. Es pot dir que pren decisions sol.
- Monitoritzat: funciona de forma autònoma. Un operari controla la retroalimentació del VANT. L'operari no pot controlar el seu vol, però si que pot prendre decisions davant els obstacles que aquest es troba.
- Supervisat: l'operari controla gairebé totes les operacions del vehicle aeri. Tot i això, aquest pot realitzar algunes poques operacions sense l'ajuda de l'operari.
- Autònom no adaptatiu: és un vehicle aeri no tripulat autònom, el qual té un pla de vol establert anteriorment per software. Aquest no es pot adaptar als canvis exteriors o obstacles.
- Control directa: l'operari controla totalment el moviment del vehicle aeri.

En funció de l'abast:

Categoria	Distància(km)	Altitud(m)
Micro	<10	250
Abast curt	30-70	3000
Abast mitjà	70-200	5000
Autonomia mitjana	>500	8000
Autonomia mitjana, altitud baixa	>500	3000
Autonomia mitjana, altitud mitja	>500	14000
Autonomia mitjana, altitud alta	>2000	20000
Estratosfèric	>2000	30000
Exo-estratosfèric	ND	>30000

Taula 4. Tipus de VANT segons abast.

Apart de les classificacions vistes anteriorment es poden també classificar per a la seva estructura. Aquesta pot ser:

- Helicòpter (amb una hèlix).
- Avió (amb dos ales horitzontals i motors horitzontals).
- Dirigibles (funcionen com un globus d'heli que per la diferència de pressió floten en l'aire i amb un motor es dirigeixen).

- Multi rotor (contenen varis motors horitzontals equidistants al centre de masses. Segons la velocitat de cada motor i direcció s'aconsegueix un alt rendiment en àmbits de maniobra).



Fig. 2.2. Estructura helicòpter.



Fig. 2.3. Estructura avió.



Fig. 2.4. Estructura dirigible.



Fig. 2.5. Estructura multicòpter.

Vist els diferents tipus de morfologia s'ha escollit la de multicòpter ja que és la més utilitzada en l'àmbit comercial i la que s'adapta més a les nostres necessitats d'estabilitat i facilitat de mantenir el vehicle aeri no tripulat en vol sense moure's de la posició.

### **2.3. Elecció del tipus de multi-rotors.**

Com hem vist fins ara, hi ha diversos tipus de vehicles aeris no tripulats. Això també passa dins dels multi-rotors. Els tipus més normals són els tri-rotors, cuat-rotors, hexa-rotors i octa-rotors.

Per la finalitat que es vol utilitzar el dron, les propietats que es busquen són les següents:

- Simplicitat i baix pes en l'estructura.
- Capacitat de transportar càrregues ( com per exemple una càmera).
- Fàcil transport i maniobrabilitat.
- Autonomia superior a 10 minuts.

Configuracions bàsiques:

Tricòpter: És un vehicle simple i fàcil de construir. També és el més barat. És molt poc estable ja que té parts mòbils en l'estructura. El problema d'utilitzar només tres motors

és que s'aconsegueix poca força i els motors tenen que anar més ràpid, el qual implica un desgast major de bateria.

**Quadricòpter:** És més simple mecànicament que l'anterior. Pesant gairebé el mateix aconseguix tenir un terç més de força. Solen ser molt més estables ja que tenen una estructura fixe. Al comptar amb quatre motors, aquests poden girar a menys revolucions, el que significa que el desgast de bateria és menor que en els tricòpters. El principal problema és que no tenen redundància, això significa que si falla un motor el vehicle no es pot controlar.

**Hexacòpter:** Quan parlem d'aquest tipus de vehicle aeri no tripulat, es pot parlar d'una ampliació de les característiques esmentades anteriorment en els vehicles de quatre rotors, és a dir, característiques molt semblants però augmentades, per tant, poden portar més càrrega i tenen més potència. Aquest augment és degut a la incrementació del nombre de motors fins a sis. Un dels principals avantatges d'aquesta morfologia en vers a l'anterior és que si es perdés la funcionalitat d'un motor en mig del vol el dron podrà ser capaç de mantenir un vol més o menys estable fins a poder aterrar, el principal moviment que es veuria afectat seria el control de l'angle 'yaw' que vindria a ser l'angle de gir de l'eix perpendicular a l'eix x i y establerts normalment. Una de les desavantatges seria l'augment del cost.

**Octacòpter:** Aquests tipus de vehicles aeris no tripulats consten de 8 motors. Aquest tipus de dron, al tenir un gran nombre de motors pot portar molta càrrega i tenen una elevada potència. Són utilitzats majoritàriament quan la càrrega que ha de portar té un cost molt elevat ja que l'avantatge principal de tenir vuit motors és que aconseguix una gran redundància, per tant, si es perd un motor aquest pot volar amb normalitat. El principal problema és que consumeix molta energia i té un cost molt elevat.

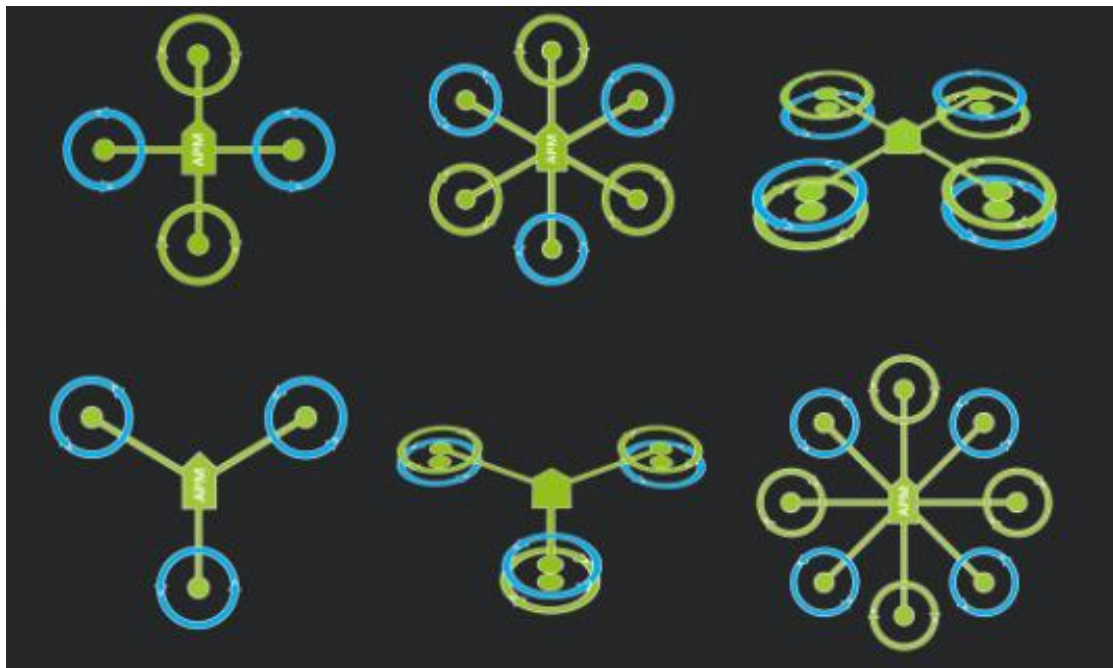


Fig. 2.6. Configuracions bàsiques d'estructura.

Configuracions complexes:

Y6: La morfologia de vehicles aeris no tripulats Y6 és utilitzada quan es parla de un tricòpter coaxial, és a dir es munten dos motors en cada braç del vehicle, en total sis motors. La principal diferència d'aquests amb els tricòpters és que els Y6 tenen redundància i a més a més poden suportar més càrrega. Per altre banda, el seu cost és mes elevat i la seva morfologia molt més complexa.

X8: El tipus X8 s'utilitza per parlar de vehicles aeris no tripulats de quatre braços amb dos motors a cada braç. Per dir-ho d'una altra manera, estem parlant d'un quadricòpter coaxial. Com en el cas anterior aquest guanya en major capacitat de càrrega amb el seu antecessor i a més a més aconseguix redundància. Tot i així el fet de tenir vuit motors no significa que tingui la mateixa eficàcia que un octacòpter de vuit motors radials ja que en treballar amb motors coaxials es perd rendiment en les hèlix.

V8: Es parla de V8 quan es vol parlar de un tipus de dron de vuit motors instal·lats en forma de 'V'. El fet d'estar dissenyat en aquesta configuració fa que tingui un gran angle de visió, per això va ser dissenyat per a la fotografia aèria. Aquest tipus de morfologia és molt complicada de dissenyar i té un cost molt elevat.



Fig. 2.7. Estructura V8.

Monocòpter: Aquest és un cas molt especial, ja que és una morfologia de vehicle aeri bastant desconeguda. El monocòpter gira sobre el seu propi eix i està compost per un únic motor tangent a la trajectòria del vehicle. Un dels problemes més importants és que per arrencar el vol necessita un suport fins que els motors han arribat a una velocitat determinada.

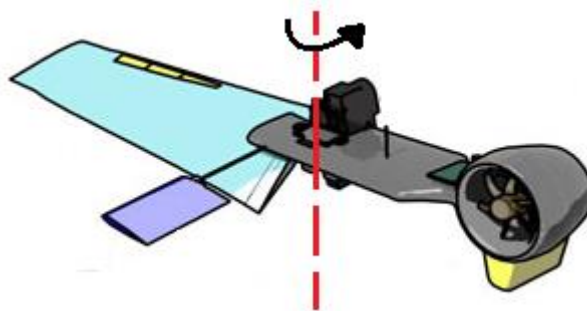


Fig. 2.8. Estructura monocòpter.

Vistes les diferents morfologies, es pot decidir la morfologia que es seguirà. Primerament es descarta la opció del monocòpter ja que dinàmicament és de les més complicades d'entendre i la que ens dificulta més la possibilitat d'afegir-hi una càmera o altres aplicacions.

També es descarta la opció del tricòpter principalment per la seva falta d'estabilitat i la poca capacitat de càrrega a més de l'alt consum d'energia dels motors. Per tant, per la possibilitat de poder ampliar el nostre vehicle i donar-li més aplicacions sense complicar massa la morfologia s'ha decidit tres possibles candidats, el quadricòpter, l'hexacòpter i l'octacòpter, descartant d'aquesta manera totes les configuracions complexes. Ràpidament s'ha descartat la possibilitat del quadricòpter, ja que es busca una gran capacitat de càrrega i a més a més és interessant tenir redundància cosa que el vehicle amb quatre motors no ofereix. De cara a l'opció amb vuit o sis motors:

Avantatges de un nombre elevat de motors:

- Major capacitat per suportar càrregues.
- Els motors poden anar a menys revolucions per minut per aguantar la mateixa càrrega.
- Les hèlix poden ser més petites i amb una resposta més ràpida.
- Com més motors més redundància.
- Més estabilitat.

Vistes les avantatges comentades amb nombre més elevat de motors, s'ha de dir que com s'ha comentat anteriorment un vehicle amb sis hèlix també té capacitat de redundància encara que molt poca i una bona capacitat de càrrega tot i que a menor mesura. Encara que l'estabilitat sigui més petita i la càrrega suportada sigui menor ens hem decantat cap a l'hexacòpter ja que és més eficient entre un 5 i un 10% tenint en compte la relació càrrega-pes. També s'ha decidit el de sis motors perquè el preu d'un octacòpter s'incrementa respecte al d'un hexacòpter en un 30%.

Si es busqués un vehicle per fer acrobàcies i no tinguéssim amb compte l'estabilitat d'aquest ens hauríem de decantar per un vehicle més lleuger com un quadricòpter.

## **2.4. Normativa de vol a l'estat Espanyol.**

El 4 de Juliol de 2014 es va publicar la llei de regulació i ús de drones per tot Espanya. Aquesta llei només es aplicable a vehicles aeris no tripulats de menys de 150kg de pes, i regulen la utilització d'aquests per a condicions tals com gravació aèria, fotografia aèria, estudis de fotogrametria i vigilància i revisió d'infraestructures entre altres. Si es fa volar el vehicle al marge de la llei, la multa podria ser d'entre 3.000 i 60.000 euros.

La part que ens importa d'aquesta llei principalment es divideix en dos tipus de drones: pes inferior a 2kg o pes entre 2kg i 25kg. En cas dels drones de pes menor a 25 kg, no caldrà que estiguin inscrits en el registre d'aeronaus ni disposar d'un certificat d'aeronavegabilitat.

En el cas dels drones amb pes inferior a 2kg aquests podran volar fins a la distància que arribi l'emissor i a una altura inferior a 120 metres sempre i quan es tingui un localitzador per saber en tot moment on es el dron. Els de més de 2kg poden arribar a 500 metres i una altura no major de 120metres . Per a ambdós tipus de drone , caldrà incloure obligatòriament una placa identificativa amb el nom del fabricant de l'aparell així com les dades fiscals de l'empresa que dugui a terme aquestes operacions, o una persona de contacte.

Un dels apartats més importants d'aquesta llei és que per utilitzar un drone s'ha de demanar un certificat oficial amb un mínim de cinc dies d'antelació si el pes del vehicle és major a 25kg, o només enviar un comunicat d'avís a l'AESA(agència estatal de seguretat aèria) si el pes d'aquest és inferior a 25kg, tenint sempre en compte que la normativa prohibeix volar en nuclis urbans i amb zones d'aglomeració de gent.

Cal a dir també que en un espai totalment tancat es pot fer volar el vehicle, ja que no es considera espai aeri.

Finalment, perquè l'usuari pugui fer volar un dron és necessari tenir un permís que acrediti a conduir-lo. Aquest permís no serà necessari si l'usuari te el carnet d'avió, o semblant. El permís de conducció de drons només serveix per el tipus de dron amb el qual has fet l'examen pràctic. També tenir en compte que per pilotar un dron es demanen exigències mínimes que han de complir l'assegurança obligatori de responsabilitat civil, per tant el dron ha d'estar assegurat.



# Capitol 3

## Disseny mecànic:

### 3.1.Cinemàtica dels moviments principals d'un hexacòpter:

Com s'ha vist fins ara, la característica principal d'un multicòpter és el desplaçament aeri, per tant es dedueix que els moviments principals d'aquests seran enlairar, baixar, moure's a la dreta i a l'esquerra, endavant i endarrere i girar en si mateix. Per a fer això es juga amb la velocitat de gir dels motors i el sentit de gir d'aquests, per aconseguir d'aquesta manera que la força total aplicada a el dron sigui en la direcció desitjada. Per el moviment d'enlairament s'han de posar els motors a la mateixa velocitat per aconseguir que el sumatori de forces sigui en direcció contrària a la força de la gravetat. En el moviment per anar endavant, el dron el que fa és mantenir alguns dels motors a la velocitat desitjada i augmenta i disminueix la velocitat d'alguns altres. Veiem en la imatge següent un exemple:



Fig. 3.1. Gir dels motors per trajectòria indicada

A partir d'aquest exemple, utilitzant sistemes de sumatoris de forces es poden intuir els altres moviments que es poden necessitar. Tot i això en llenguatge específic els moviments més utilitzats són referenciats a angles de gir dels eixos, aquests moviments són anomenats de pitch, yaw i roll.

El moviment de yaw, permet a l'hexacòpter moure's sobre el seu eix vertical. El moviment de roll permet al dron moure's en direcció esquerra o dreta, i el moviment de pitch permet a l'hexacòpter moure's endavant o cap a darrera.

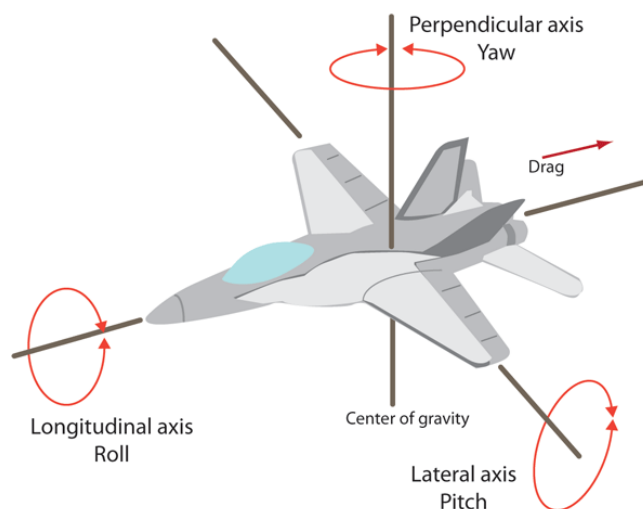


Fig. 3.2. Tipus de gir segons els eixos del multicòpter.



## 3.2. Fonaments aerodinàmics:

Com se sap, el gir d'un motor amb una hèlix genera una força, que en la direcció adequada serveix per fer volar alguns vehicles. Això no es suficient per a la nostre finalitat. Un dels apartats més importants a tenir en compte és que els motors consumeixen molta energia, per tant és molt important saber la quantitat d'energia necessària per el vol estacionari del nostre dron. Per a poder realitzar aquest càlcul matemàtic i ha diverses formes o teories per fer-ho, entre elles la teoria de la quantitat de moviment que és la que s'utilitzarà ja que s'ha decidit que és la més apropiada en funció dels coneixements impartits durant el grau.

Teoria cinètica de la conservació de la quantitat del moviment:

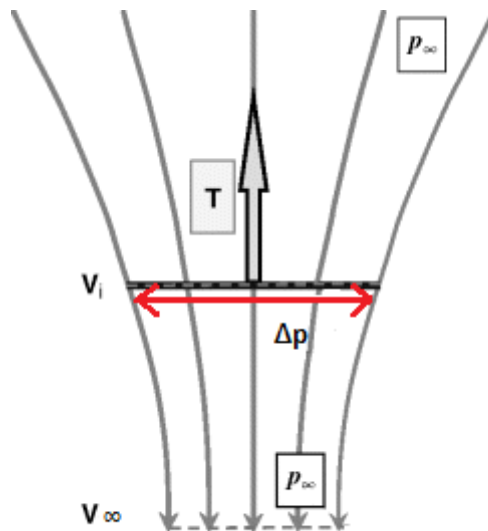


Fig 3.3. Esquema aerodinàmic de l'hèlix.

Com podem veure a la figura 3.3. al girar l'hèlix crea un corrent d'aire clarament definit per sobre i per sota l'hèlix. En la part superior de l'hèlix, com que l'aire és aspirat la pressió cau fins que arriba al seu valor màxim que és  $\Delta p$ , és a dir, l'increment de pressió que genera sobre l'hèlix, i llavors aquesta pressió torna a disminuir fins a arribar a condicions normals anomenades en aquest cas  $p_\infty$ . per el que fa a la velocitat de l'aire aquesta va augmentant des de zero a l'inici fins a un valor  $v_\infty$  al final del corrent d'aire, passant per  $v_i$  justament en el disc que forma l'hèlix.

### 3.2.1. Model matemàtic en estat estacionari:

Mirant el diagrama anterior, podem aplicar l'equació de Bernoulli en dos parts, la part inicial i en el flux de sortida. En la part inicial es pot afirmar com podem veure a l'equació 1 que:

$$p_\infty = p_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 \quad (1)$$

En l'equació 2 s'observa que el flux de sortida:

$$p_i + \Delta p + \frac{1}{2} \rho v_i^2 = p_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 \quad (2)$$

Per tant deduïm d'aquestes dues equacions que  $\Delta p = \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2$  on  $\rho$  és la densitat de l'aire,  $v_{\infty}$  és la velocitat de l'aire quan aquest tendeix a allunyar-se de l'hèlix, i  $\Delta p$  és l'increment de pressió en les hèlix.

Ara bé, per conservació del moment la força  $T$  en l'hèlix és igual a la taxa global d'augment de quantitat de moviment axial en l'aire, és a dir:

$$T = \rho A v_i v_{\infty} \quad (3)$$

On de l'equació 3, " $A$ " significa l'àrea del disc que forma l'hèlix. Com que  $\Delta p$  és l'augment de pressió per unitat d'àrea, llavors es té:

$$\Delta p = \frac{T}{A} = \rho v_i v_{\infty} \quad (4)$$

On es considera que  $v_{\infty} = 2 v_i$ , per tant:

Si es conegués la força  $T$  es podria utilitzar l'equació 5 per trobar  $v_i$ .

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2 \rho A}} \quad (5)$$

Finalment, una última equació que ens podria ser útil és la potència induïda pel rotor. Aquesta és el treball realitzat sobre l'aire representat per el seu canvi de l'energia cinètica per unitat de temps:

$$P_i = T v_i = \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2} \rho A} \quad (6)$$

### 3.2.2. Model matemàtic en ascens.

Mirant l'equació 6, que permet trobar la potència necessària dels motors amb vol en estat estacionari, es pot deduir que la potència necessària en el vol en ascens es podrà calcular utilitzant la fórmula 7.

$$P_i = T (v_c + v_i) \quad (7)$$

On en l'equació 9, podem observar que  $v_c$  és la velocitat màxima de pujada que ha de tenir el multicòpter i  $v_i$  la velocitat induïda del vol estacionari, que es pot calcular de la següent manera:

$$\frac{v_i}{v_{i0}} = -\frac{1}{2} \frac{v_c}{v_{i0}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{v_c}{v_{i0}}\right)^2 + 1} \quad (8)$$

Per tant, utilitzant un pes de 3kg del multicòpter i un pes de 3kg de càrrega a una velocitat màxima d'ascens de 6 metres per segon, dona un resultat de potència requerida per cada motor de **303.2W**.

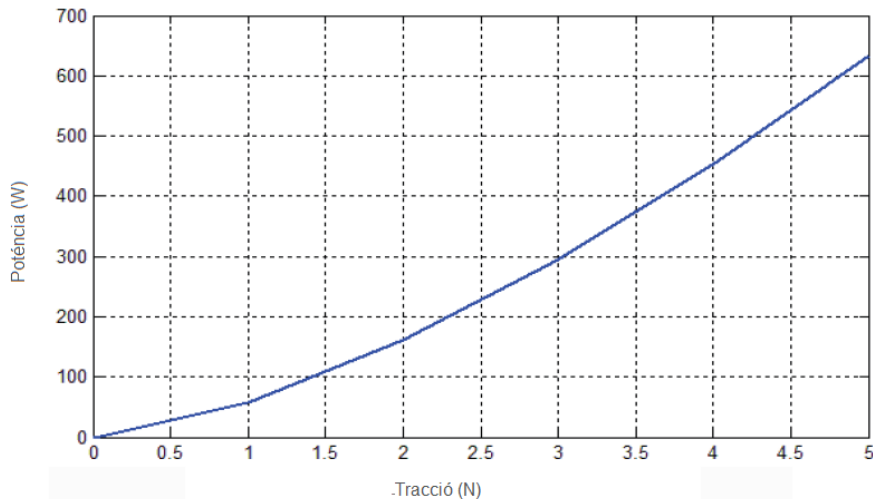


Fig. 3.4. Gràfic potència-Tracció en vol estacionari.

Com es pot veure en la figura 3.4, la potència de cada motor en funció de la força que ha de fer no és constant. Com més gran és la força que ha de fer cada motor el pendent de la recta per trobar la potència augmenta. Per tant la relació potència-tracció podem dir que com que el pendent és més petit en traccions petites si el que es busca són motors amb una relació potència-pes baixa, s'ha de construir un dron amb poc pes.

### **3.3. Disseny de l'estructura:**

Per el disseny estructural del dron s'ha començat treballant a partir de drons comercials amb característiques similars al que es vol construir. Després de buscar s'ha arribat a la conclusió que la mida d'aquests varia molt en funció de la finalitat i el pes total. S'ha observat també que molts multicòpters diferenciaven poc la part estructural principal que uneix els braços, amb el tren d'aterratge. També s'ha observat que les possibilitats de construir l'estructura eren diverses com: imprimir-la tota d'una peça, fer diferents peses i enganxar-les amb algun tipus de producte químic, o aquestes peses collades amb cargols. S'ha considerat que en el nostre disseny es diferenciarien la part principal amb els braços i la placa base, amb el tren d'aterratge, i totes les peses anirien collades amb cargols.

Per començar s'ha fet un estudi de els diferents materials disponibles amb els quals es podria treballar.

#### **3.3.1. Materials de l'estructura:**

Actualment en el mercat hi ha disponible molts materials diversos amb diferents propietats que serien útils per a la fabricació de l'estructura del vehicle aeri no tripulat. Les propietats que s'han establert com a més importants per a l'estructura del dron son les següents:

- Baixa densitat.
- Baixa flexibilitat.
- Alta tenacitat.

- Baixa plasticitat.
- Bona conductivitat tèrmica.
- Facilitat de treball.
- Preu econòmic.

La densitat, és la propietat fisico-química de la qual en depèn gran part del pes final del material. Com més densitat, més pes tindrà el material. És important per a la construcció d'un dron que l'estructura mecànica sigui el més lleugera possible, ja que el pes total del producte és un dels factors més importants per el bon funcionament del vehicle.

La baixa flexibilitat és desitjada ja que no és adequat que amb els moments realitzats en els extrems del vehicle, tant per la força dels motors o la mateixa fricció amb l'aire podrien fer que l'estructura flexionés i es desestabilitzés el dron. Tot i així s'ha de tenir en compte que les juntes de els motors amb l'estructura i de els sensors estiguin sobre un material mínimament flexible per tal d'amortir les vibracions.

La tenacitat és la propietat que descriu la capacitat d'un material a absorbir impactes sense que es faci malbé l'estructura, és a dir sense que es dobli o es trenqui. Aquesta propietat va relacionada amb la baixa plasticitat, ja que no ens interessa que amb un impacte el vehicle aeri no tripulat no es dobli i deixi inutilitzada l'estructura.

La bona conductivitat tèrmica és simplement per a refrigerar correctament els elements del dron, com la bateria, els motors, els esc etc...

Dit això, s'ha fet una llista de materials els quals es té relativament facilitat d'accés. Aquests són:

- Aliatges d'alumini.
- Fibra de carboni.
- PLA (poliàcid-làctic).

### 3.3.1.1. Alumini 6060:

L'alumini 6060 és un de els aliatges més utilitzats per a la fabricació de peces, perfils i xapes d'alumini. Aquest aliatge està format per alumini, magnesi i silici principalment. La composició química completa la observem a la taula 5.

Composició química										
%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	altres	Al
Mínim	0,3	0,1			0,35				Total	
Màxim	0,6	0,3	0,1	0,1	0,6	0,05	0,15	0,2	0,15	La resta

Taula 5. Composició química alumini 6060

Propietats mecàniques típiques:

- Densitat =  $2.7 \text{ g/cm}^3$ .
- Interval de fusió=  $585\text{-}650 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Coeficient de dilatació lineal=  $1/10^6 \text{ K}^{-1}$  23,4.
- Conductivitat Tèrmica =  $209 \text{ W/mK}$ .



Fig. 3.5. Exemple peça d'alumini 6060.

- Resistència a tracció= 160-200 Mpa(N/mm<sup>2</sup>).
- Mòdul de Young= 70GPa
- Límit elàstic= 110N/mm<sup>2</sup>.
- Límit ruptura= 150N/mm<sup>2</sup>.
- Resistència de cisalla= 117Mpa.
- Resistència a la corrosió molt bona.

Per tant, observant les propietats mecàniques d'aquest material, observem que té una densitat baixa, no és corrosiu, i un límit elàstic i de ruptura alt, cosa que ens aniria bé per a la funció que ha d'exercir. El mòdul de Young és relativament baix, per tant tot i ser un material elàstic no ho és excessivament.

### 3.3.1.2. Fibra de carboni:

La fibra de carboni és una fibra sintètica constituïda per fins filaments de 5-10 micres de diàmetre i composta principalment per carboni. Cada fibra de carboni és la unió de milers de filaments de carboni. Es tracta d'una fibra sintètica perquè es fabrica a partir de poliacrilonitril. Té propietats mecàniques similars a l'acer i és tan lleugera com la fusta o el plàstic. Per la seva duresa té major resistència a l'impacte que l'acer.

L'ordre dels àtoms de carboni en les capes és similar al grafè, per això normalment es sol dir capes de grafè. Aquest tipus d'estructures implica que la fibra pugui tenir diferències entre les propietats que venen determinades per diferents raons:

- Existència d'enllaços covalents C-C en les capes, amb contrast als enllaços de Van Der Waals que actuen entre les capes.
- Perfecció d'orientació tant en sentit longitudinal com transversal.
- Presència de porus o imperfeccions.
- Procés i condicions de fabricació.
- Tipus de precursor utilitzat ( compost químic que participa i desencadena una reacció química )

En la imatge 3.6 i 3.7 s'observa a la part esquerra una mostra de fibra de carboni, i en la dreta la distribució atòmica de les fibres de grafè.

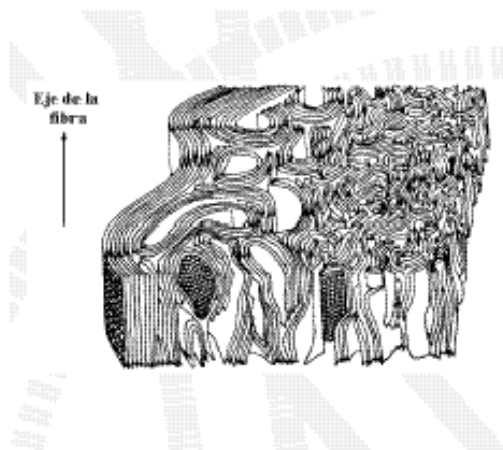


Fig.3.6 Fibra de carboni.

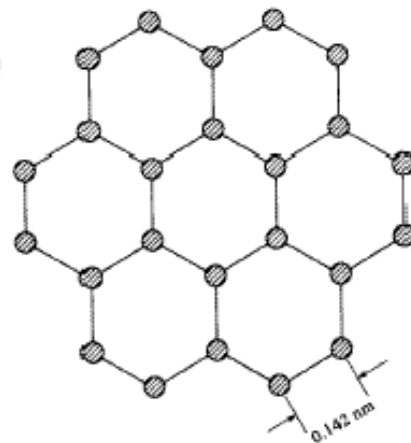


Fig.3.7. Distribució atòmica de grafè.

Propietat	SMA	SMB	IMB	HMB
Contingut carboni	95 %	95 %	95 %	>99 %
Diàmetre fibra	6 a 8 µm	6 a 8 µm	5 a 6 µm	5 a 8 µm
Densitat	1,8 g/cm <sup>3</sup>	1,8 g/cm <sup>3</sup>	1,8 g/cm <sup>3</sup>	1,9 g/cm <sup>3</sup>
Mòdul de Young	228 Gpa	220-241 Gpa	290-297 Gpa	345-448 Gpa
Resistència a ruptura	3800 Mpa	3450-4830 Mpa	3450-6200 Mpa	3450-5520 Mpa
Allargament a ruptura	1,6 %	1,5-2,2 %	1,3-2,0 %	0,7-1,0 %
Resistivitat elèctrica	1650 u/cm	1650 u/cm	1450 u/cm	900 u/cm
Conductivitat tèrmica	20 W/m.K	20 W/m.K	20 W/m.K	50-80 W/m.K

Taula 6. Propietats físiques de la fibra de carboni.

En la taula 6, podem observar les propietats mecàniques de fibres de carboni amb alt contingut de carboni. Per tant, observant les propietats mecàniques s'observa que té una densitat menor que en el cas anterior. Això significa que el pes de l'estructura seria menor. El mòdul de Young és alt, per tant és menys flexible que l'alumini, i finalment dir que la resistència a ruptura és molt més gran, per tant seria un gran candidat per a l'estructura de un multicòpter.

### 3.3.1.3. PLA (àcid poli làctic):

L'àcid poli-làctic és un polímer termoplàstic biodegradable amb alt contingut de midó que aconsegueix assemblar-se molt a plàstics derivats del petroli. Per tant, les propietats d'aquest poden ser semblants o iguals en curts terminis a les propietats dels plàstics derivats del petroli.

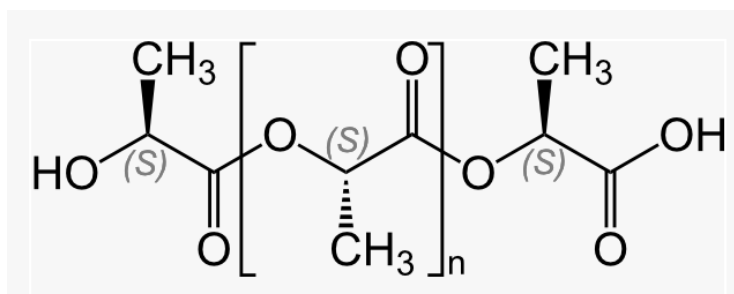


Fig. 3.8. composició i configuració química del PLA.

Propietat	PLA
Densitat	1,25-1,5 g/cm <sup>3</sup>
Mòdul de Young	3,5Gpa
Resistència a flexió	80Mpa
Resistència a tracció	50Mpa
temperatura deflexió del calor	65°C
Temperatura de fusió	160°C
Conductivitat tèrmica (W/m.K)	0,13
Elongació a ruptura	6%

Taula 7. Propietats físiques del PLA.

Com es pot observar a la taula 7, el PLA és un material amb una densitat molt baixa, per tant, això ajuda a tenir un pes baix en l'estructura del material. El mòdul de Young d'aquest material és molt baix, per tant aquest és un material molt flexible cosa que és un inconvenient per l'ús desitjat. Finalment la resistència d'aquest material és més baixa que en els dos materials vistos anteriorment.

Després d'analitzar els tres tipus de materials, s'ha arribat a la conclusió que per prestacions, el millor material que es podria utilitzar és la fibra de carboni. Tot i això, és un material molt difícil de treballar ja que la seva distribució atòmica fa que al intentar fresar-lo o manipular-lo aquest es pugui trencar molt fàcilment.

Per altre banda, l'alumini té unes prestacions una mica inferiors a la fibra de carboni, tot i això també té unes prestacions molt aptes per la nostra necessitat. L'avantatge d'aquest material és que és un material amb el qual és molt fàcil treballar per la seva ductilitat i molt fàcil de trobar en el mercat.

Finalment el PLA, en prestacions és el pitjor dels tres, però és un material que es pot utilitzar en impressió amb 3D.

Per les raons comentades, totes les peces que s'hagin de treballar poc es faran amb fibra de carboni, les peces que s'han de fresar o treballar més es faran amb alumini, i les peces que s'hauran d'imprimir amb 3D es faran amb PLA.

### **3.3.2 Disseny de les peces.**

#### **3.3.2.1 Estructura principal:**

Per el disseny de l'estructura, el que s'ha tingut més en compte és el pes total que podria arribar a tenir el multicòpter. Aquest pes determina en gran part el diàmetre de les hèlix ja que com més grans siguin les hèlix, més pes podrà suportar el multicòpter. Buscant altres multicòpters en el mercat amb prestacions semblants al que es vol aconseguir, s'ha arribat a la conclusió que les hèlix solen anar de 18 a 25 cm de diàmetre.

Agafant els valors d'inici del diàmetre de les hèlix d'aproximadament 22 cm, es pot començar a fer un esbós del que serà el nostre disseny.

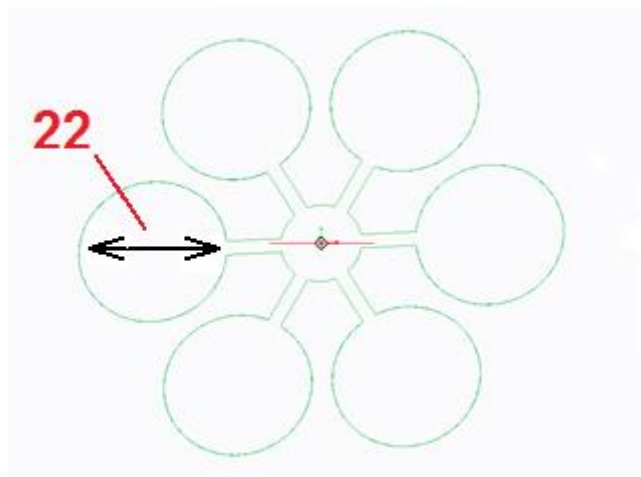


Fig.3.9. Esbós disseny.

Veiem en la figura 3.9, un esbós creat a partir de hèlix de 22cm de diàmetre. Perquè el multicòpter pugui volar correctament, s'ha de deixar un espai entre hèlix de aproximadament 3cm com a mínim, ja que sinó, la força necessària per aixecar el vehicle serà més gran per les interferències de l'aire. Partint d'aquest primer esbós, s'arriba a la conclusió que la el diàmetre total sense hèlix del multicòpter ha de ser de com a mínim 500mm.

A partir d'aquest esbós s'ha anat modificant l'estructura fins que s'ha arribat després de molts canvis a un resultat final.

Seguidament s'explicarà detalladament totes les peces que s'ha cregut necessari dissenyar. Les dimensions complertes d'aquestes peces es poden trobar a l'annex 2.

Primerament s'ha cregut que la part més determinant per a escollir eren els braços. Com s'ha vist anteriorment, segons l'estudi fet de materials s'ha escollit l'alumini per aquest cas, ja que el seu pes no es gaire elevat, té una bona tenacitat i una baixa flexibilitat. L'avantatge principal respecte els altres materials és la facilitat de treballar amb aquest material, la facilitat de trobar-lo en el mercat i el seu reduït cost.

Com veiem en la figura 3.10 finalment es va escollir un perfil d'alumini de 21cm de llargada, el qual com s'observa té una ranura inferior per on es podrien passar els cables. També s'observa en la figura 3.10 que la peça conté 4 forats els quals aquests dos seran per collar el braç a l'estructura principal (número 1 en la imatge 3.10) i 2 per collar els motors (número 2 en la imatge 3.10).

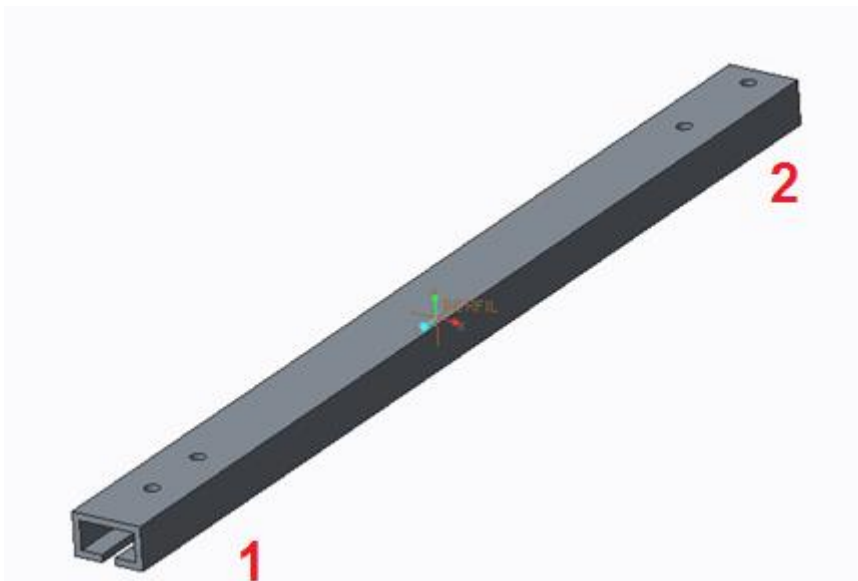


Fig. 3.10. Dibuix 3D del braç del multicòpter.

Un cop escollit la forma i el material dels braços que subjectaran els motors, s'ha dissenyat l'estructura principal, és a dir la placa que uneix els braços. Aquesta ha estat dissenyada acuradament, tenint en compte que ha de tenir el menor pes possible, i que ha de ser suficientment resistent per aguantar la força dels braços sense flexionar. Per a dissenyar les dimensions d'aquesta placa s'ha de tenir en compte varis temes com:



- Dimensions de la placa controladora.
- Espai suficient per altres elements de control.
- Mínim pes possible.
- Subjecció dels braços adequada.
- Posicionament i ranures per a altres elements estructurals.
- Distribució morfològica bona per donar la màxima rigidesa a la peça.

El resultat final després de molts canvis és una placa de 18 centímetres de diàmetre al punt més allunyat del centre, amb tantes ranures com sigui possible per tal d'alleugerar la placa sense perdre molta resistència. S'ha considerat per aquesta peça utilitzar una xapa d'alumini 6060 de 1'5mm de gruix, ja que s'ha decidit utilitzar la fresadora per realitzar aquesta peça. Per a formar l'estructura, d'aquesta placa explicada posteriorment se'n faran dues d'iguals, que seran les encarregades de collar els braços.

S'observa en la figura 3.11 que la peça ja inclou tots els forats necessaris per el muntatge de tots els elements. El forats per el muntatge dels braços estan indicats amb un 1, els forats per el muntatge del tren d'aterratge estan indicats amb el 2, els forats per muntar el suport de la placa controladora es poden trobar amb el 4, i finalment el forat indicat amb el número 3 i els seus simètrics respectivament es va crear inicialment per collar un separador entre la placa principal i la placa del suport de la bateria, però finalment aquesta funció es va anular.

S'observa també que les ranures per alleugerar pes i passar cables s'han realitzat de forma simètrica i de manera que no es transformin en crítiques per a la resistència de la peça, en la figura 3.11 es pot veure que totes les ranures interiors estan arrodonides, d'aquesta manera s'aconsegueix reduir els esforços en aquestes parts de la peça. Segons els forats per al muntatge de la peça els buidatges per alleugerar pes s'han hagut d'anar modificant.

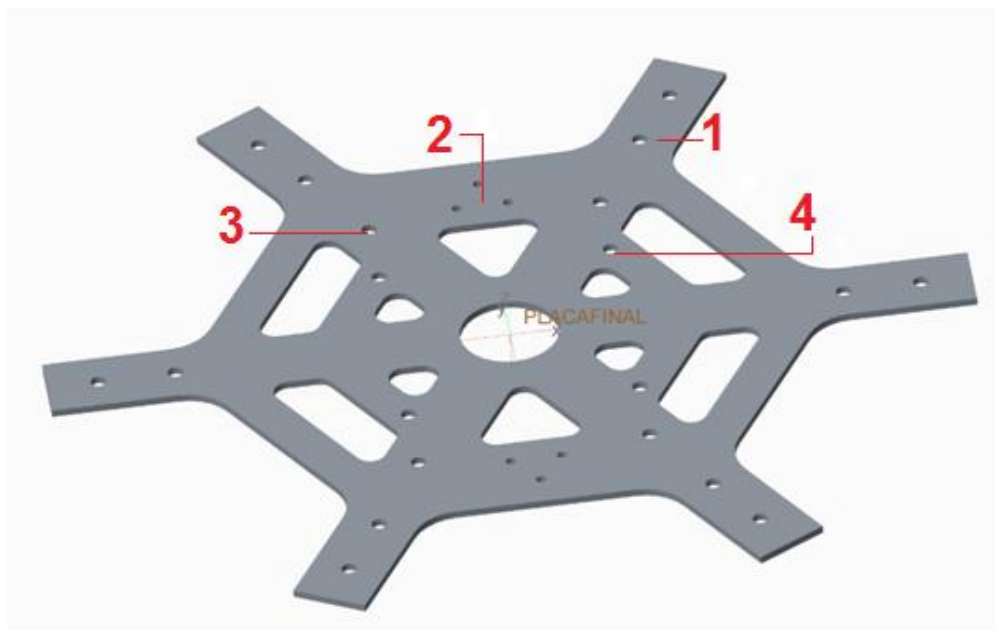


Fig. 3.11. Dibuix 3D de la placa principal.

Un cop dissenyada aquesta placa s'ha decidit realitzar una altre placa entremig dels perfils i la plaques principals per així donar més resistència a aquesta estructura. Per altre banda aquesta placa ajudarà a que els braços quedin més ben fixats i impedirà que pugin moure's cap als laterals apart de la seva ajuda en l'hora del muntatge.

Per a realitzar aquesta placa s'ha decidit utilitzar el mateix material que en el cas anterior, és a dir alumini 6060 de gruix 1'5mm ja que es treballarà amb la fresadora. Com s'observa en la figura 3.12 aquesta té les ranures per els braços, a part de totes les ranures necessàries per a el muntatge correcta.

Ja que aquesta placa només ha de servir de guia i de reforç, s'ha buidat tot l'interior d'aquesta per alleugerà pes. Veiem en la figura 3.12 que el forat indicat amb 1 i els seus simètrics serveixen per a collar aquesta placa amb la placa principal utilitzant els forats indicats en 3 de la figura 3.11. Amb el 2 s'indica una ranura que s'ha hagut de fer per a deixar passar el cargol que collarà l'estructura principal amb el tren d'aterratge. Aquesta peça, és una peça la qual té un pes molt petit però ens donarà a l'estructura final molta rigidesa, tant per part de la flexió de la placa principal al anar collada a aquesta com per part del moviment dels braços.

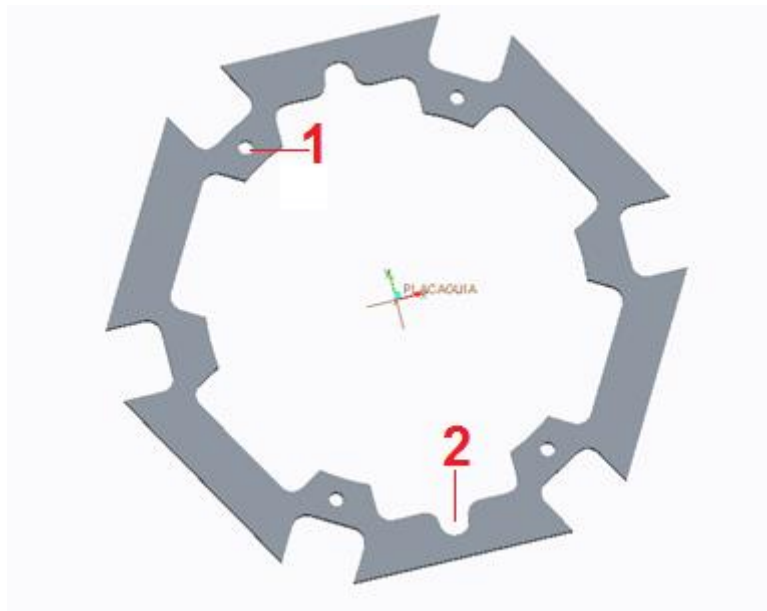


Fig. 3.12. Dibuix 3D placa guia per les braços.

Amb aquestes tres peces ja es podria muntar la part més crítica del multicòpter.

Per falta d'espai en la placa principal es muntarà una segona placa per sota de la plaques principals on anirà la bateria i altres elements electrònics. D'aquesta manera baixem el centre de gravetat del nostre multicòpter.

Aquesta placa es considera que no és tant crítica com les anteriors, ja que aquesta només és de subjecció d'elements com la bateria i d'altres, per tant podria ser feta d'altres materials més fràgils, o més flexibles. Tot i així no s'ha volgut córrer cap risc i s'ha dissenyat de la mateixa manera que les anteriors, d'alumini 6060 de 1'5mm amb ranures per alleugerar pes i ranures laterals de forma el·líptica per passar per el seu interior els peus del tren d'aterratge. Com s'observa en la figura 3.13 aquesta placa té

les ranures per alleugerà pes més grans que les anteriors, ja que com s'ha comentat és només de subjecció.

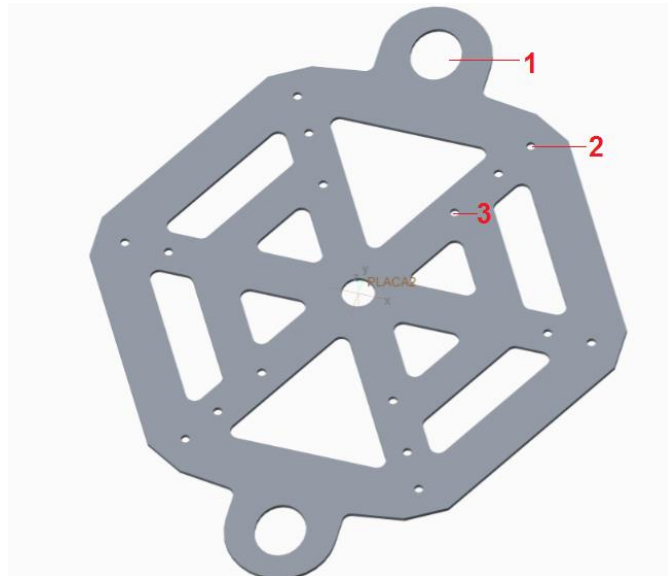


Fig. 3.13. Dibuix 3D placa suport bateria.

S'observa en la figura 3.13 indicat amb el número 1, les ranures el·líptiques per passar les barres del tren d'aterratge, que serviran també per frenar el moviment d'aquest. Indicat amb el 2 i el 3, s'observen els forats realitzats anteriorment en la placa principal indicats en la figura 3.11 com a 1 i 3. Aquests forats s'han mantingut ja que d'aquesta manera es podria escollir més d'una forma per collar aquesta placa a la placa principal en funció dels elements que s'hauran d'incorporar i el seu posicionament.

Per a collar els motors es necessita un adaptador. Aquest adaptador ja ve inclòs amb en la mateixa compra dels motors i és el que mostra la figura 3.14. Aquesta peça s'ha hagut d'analitzar ja que s'havia d'estudiar la manera de collar els motors als braços.



Fig. 3.14. Dibuix 3D de l'adaptador per collar els motors.

S'observa en la imatge 3.14 dos tipus de forats diferents, un amb xamfrà i l'altre sense. Els forats amb xamfrà són els que s'utilitzaran per a collar el motor en aquest adaptador, i els altres forats són els que s'utilitzen per collar aquest adaptador a l'estructura.

Però per a poder collar aquesta peça a la nostra estructura, és necessària una altra peça amb la qual puguem collar-la als braços del nostre vehicle, ja que la distància entre forats de l'adaptador de la figura 3.14 era més gran que l'amplada del braç de l'estructura. Aquesta peça ha estat dissenyada conjuntament amb les anteriors, també realitzada amb alumini 6060 de 1,5mm de gruix.

Es pot observar a la figura 3.15 l'adaptador final realitzat. Aquest té un orifici central que s'utilitza per a passar l'eix del motor i alleugerà pes, també s'observen dos tipus de forats més. Els més allunyats a l'eix són els que s'utilitzaran per a collar aquesta peça a l'adaptador del motor, i els que estan més a prop al centre de la peça són els que s'utilitzaran per collar aquesta peça al braç del multicòpter.

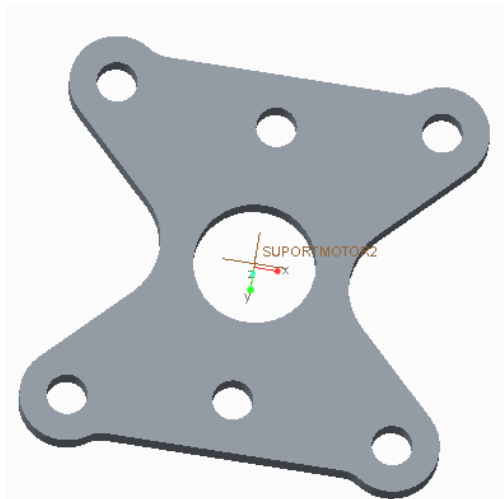


Fig. 3.15. Dibuix 3D placa per collar l'adaptador dels motors al braç.

En la figura 3.16 es pot observar tots els components explicats anteriorment muntats, com els suports dels motors, les plaques base, els braços i la placa per suportar la bateria, d'aquesta manera s'observa de forma més clara la funció de cada peça, i el seu muntatge.

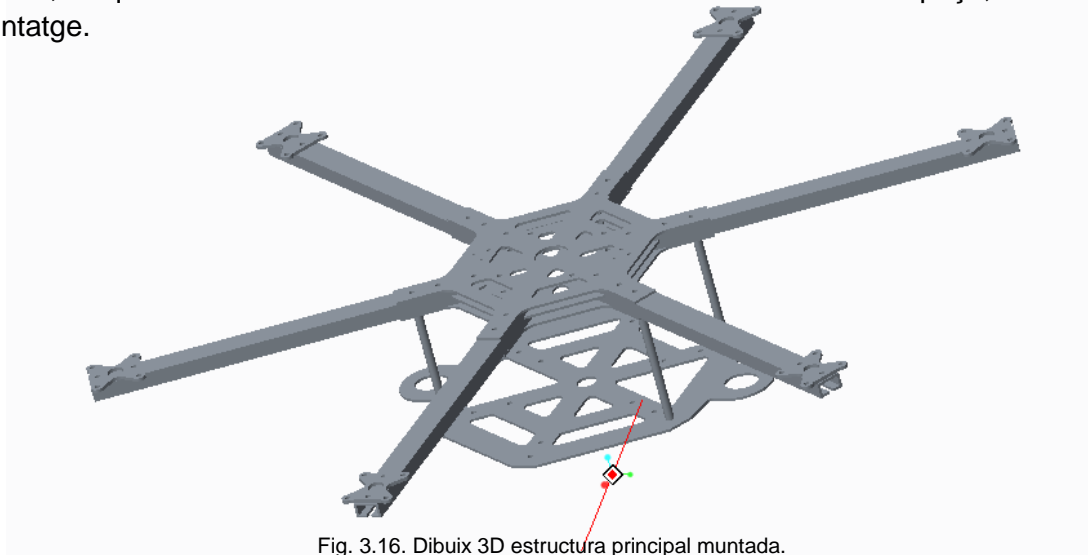


Fig. 3.16. Dibuix 3D estructura principal muntada.

### **3.3.2.2. Tren d'aterratge:**

Per al tren d'aterratge la condició més important que s'ha tingut en compte per el vol correcta del multicòpter és l'alçada d'aquest. Com més a prop estiguin les hèlix del terra més complicat serà enlairar degut a les turbulències que generarà el rebot de l'aire amb el terra. Per el disseny s'ha decidit utilitzar barres de carboni de 16mm, ja que no s'han de mecanitzar, subjectades a la placa principal que passaran per les ranures el·líptiques de la placa de subjecció de la bateria. D'aquesta manera també ajudarà que les barres de carboni no facin flexió cap a l'exterior ni l'interior. Aquestes barres tindran una distància de 25mm d'allargada i 14mm de diàmetre interior.

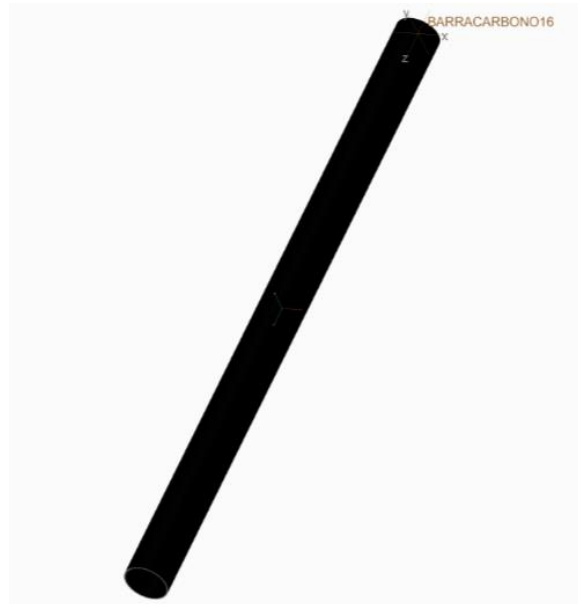


Fig. 3.17. Barra de carbono 16mm de diàmetre.

Per a enganxar aquestes barres a l'estructura dissenyada anteriorment es farà amb PLA, ja que la forma que ha de tenir és molt complexa. Primerament es farà un disseny adequat i posteriorment s'imprimirà en 3D. Aquesta peça s'observa a la figura 3.18.

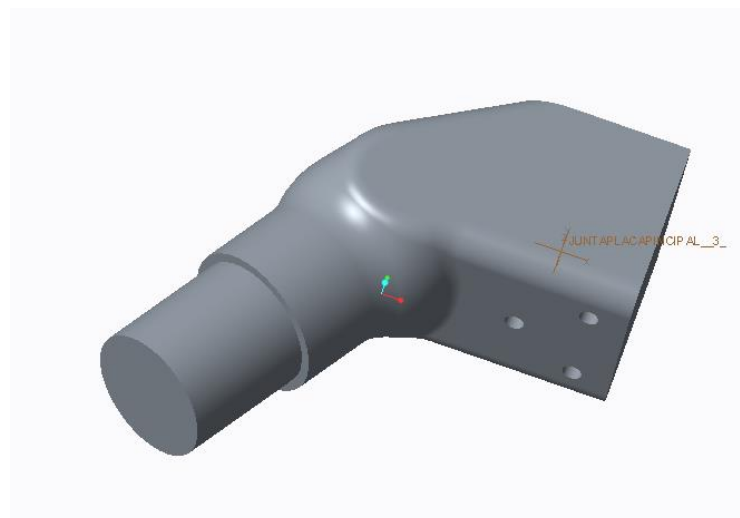


Fig. 3.18. Dibuix 3D junta tren d'aterratge amb placa principal.

Observem en la figura 3.18, que la peça està formada per una part més rectangular i una part més cilíndrica. La part que té dues cares planes és la part que anirà enganxada a la placa principal, aquesta té tres forats de mètric 3 per poder ser collada. A més, amb un angle de  $-120$  graus respecte al pla que forma les parts planes observem que d'aquesta part rectangular surt una espècie de cilindre. Aquest cilindre és on anirà enganxada la barra de carboni. La part del cilindre de diàmetre més petit fa  $14\text{mm}$  de diàmetre igual que l'orifici interior de la barra carboni i la part més ampla fa  $16\text{mm}$  de diàmetre igual que el diàmetre exterior del carboni, d'aquesta manera aconseguirem que les barres de cada banda del tren d'aterratge quedin a la mateixa altura i no hi hagi marge d'error.

Finalment s'ha hagut de dissenyar una última peça per a unir la barra de carboni cilíndrica amb la barra de carboni rectangular que farà contacte amb el terra. La barra de carboni rectangular, no ha estat dissenyada, sinó que ha estat comprada ja feta, aquesta barra té una llargada de  $20\text{cm}$  i una forma quadrada de  $10\times 10\text{mm}$ . A més té un cilindre buit de  $8\text{mm}$  de diàmetre. Aquesta barra la es pot observar en la figura 3.19.



Fig. 3.19. Barra de carboni rectangular.

Per dissenyar la peça que uneix la barra de carboni rectangular amb la cilíndrica s'ha tingut en compte que els angles entre la peça de subjecció a l'estructura i la peça de subjecció al terra han de permetre que l'estructura i el peu del multicòpter quedin paral·lels. En aquest cas, com que la peça de subjecció a l'estructura tenia un angle de  $240$  graus, aquesta ha de fer un angle de  $60$  graus, ja que  $240-60=180$ . A més com es pot observar a la imatge de la figura 3.20 aquesta peça està formada per un quadrat de  $10\text{mm}$  de costat en el qual i anirà enganxada la barra de carboni rectangular.



Fig. 3.20. Dibuix 3D junta barra rectangular.

Seguidament, en les figures 3.21 i 3.22 es pot veure el muntatge del tren d'aterratge i el muntatge de tot el multicòpter sencer per eliminar qualsevol dubte sobre la funció de cada peça.

Tren d'aterratge sencer:

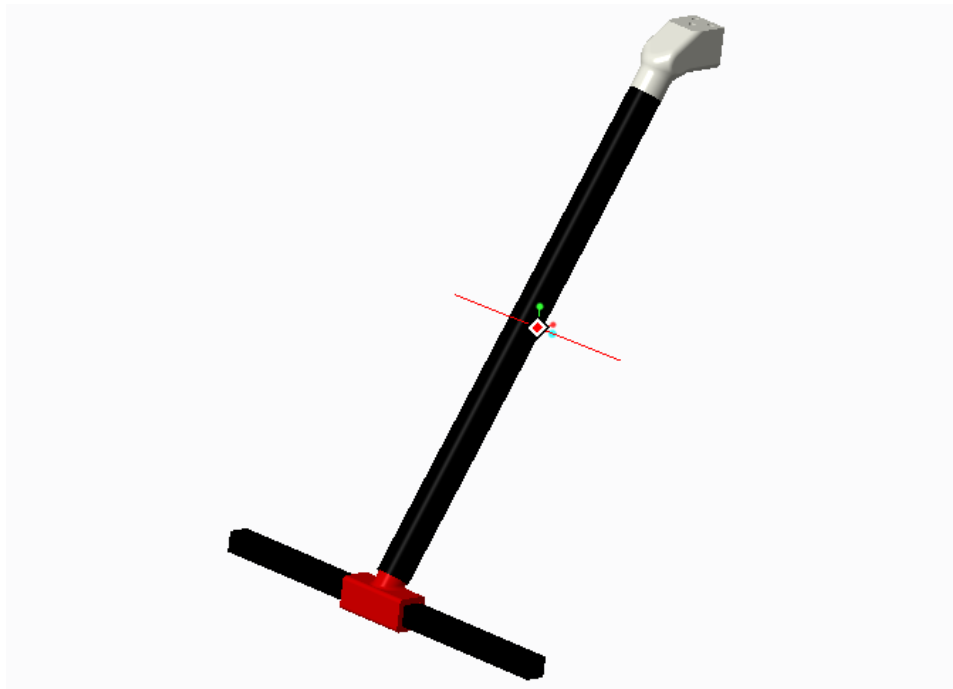


Fig. 3.21. Dibuix 3D tren d'aterratge.

Drone complet:



Fig. 3.22. Dibuix 3D multicòpter.

### 3.4. Propietats mecàniques de l'estructura

#### 3.4.1 Distribució de masses:

Definició de centre de gravetat: El centre de gravetat (CG) és el punt d'aplicació de les diverses forces de gravetat que actuen sobre la distribució de masses d'un cos.

El centre de gravetat d'un cos anomenat **K** de massa **M**, amb densitat  **$\rho(\mathbf{r})$**  sota un camp gravitatori  **$\mathbf{g}(\mathbf{r})$**  on  **$(\mathbf{r})$**  són els vectors diferencials de volum del cos, es defineix per el vector  **$\mathbf{r}_{CG}$**  que compleix:

$$M\mathbf{g}(\mathbf{r}_{CG})\mathbf{r}_{CG} = \int_K \rho(\mathbf{r})\mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{r}dV \quad (9)$$

Si el camp gravitatori i la densitat són constants, llavors l'equació és la mateixa que la del centre de masses que és:

$$\vec{R} = \frac{1}{M} \sum m_i \vec{r}_i \quad (10)$$

El centre de massa **R** d'un conjunt de partícules es troba en la mitjana de les posicions de les partícules  **$r_i$**  ponderada per les seves masses  **$m_i$** , on **M** és la massa total del sistema.

Tot i això degut a que moltes de les peses tenen un volum i una distribució la qual dificulta molt aquest càlcul manual s'ha decidit utilitzar el mateix programa de disseny per a calcular aquests.

S'ha comprovat el centre de gravetat de les peses que es consideraven crítiques per el seu disseny. No s'han analitzat les barres de carboni, els suports dels motors i els separadors ja que es considera que per disseny no poden afectar al centre de gravetat. El conjunt de peces analitzades al ser un conjunt simètric hauria de tenir un centre de gravetat **X=0**, **Y=0** i **Z** a determinar, tot i això hem realitzat aquesta operació per assegurar de no tenir errades en el disseny.

Centre de gravetat (mm)	X	Y	Z
Placa base	0	0	-0,75
Placa guia braços	0	0	-0,75
Placa suport bateria	0	0	-0,75
Junta carboni placa principal	-12,38745	-6,5536	0
Junta carboni amb peu tren aterratge	0	0,924	2,888
Braç	0	0,2767	0,01184

Taula 8. Centre de massa de les peces.

Observem que les 3 plaques tenen centre de gravetat **X** i **Y** igual a 0 i un centre de gravetat **Z** a -0,75mm. Això es degut a que l'eix de referència està col·locat exactament al centre de la peça i aquesta és totalment simètrica.



Per el que fa a les peces les quals estan marcades amb verd a la taula, aquestes tenen un centre de gravetat que amb aquests valors no ens interessaria gaire. Això es degut a que aquestes peses no són simètriques i que el punt de referència al dibuixar la peça no s'ha pogut establir exactament al mig de la peça.

Aquest fet no es transcendent, ja que totes les peses que estan marcades en verd, tenen un repartició simètrica respecta a l'eix de muntatge del nostre vehicle. Per tant, aquestes diferències del centre de gravetat s'haurien d'igualar a 0. Per a assegurar això es mesura el centre de gravetat de tot el muntatge sencer.

Com s'havia previst, el centre de gravetat en l'eix X és 0, en l'eix Y és 0 i en l'eix Z és -54.6mm respecte l'eix de referència que està situat completament al centre del disseny de la placa superior.

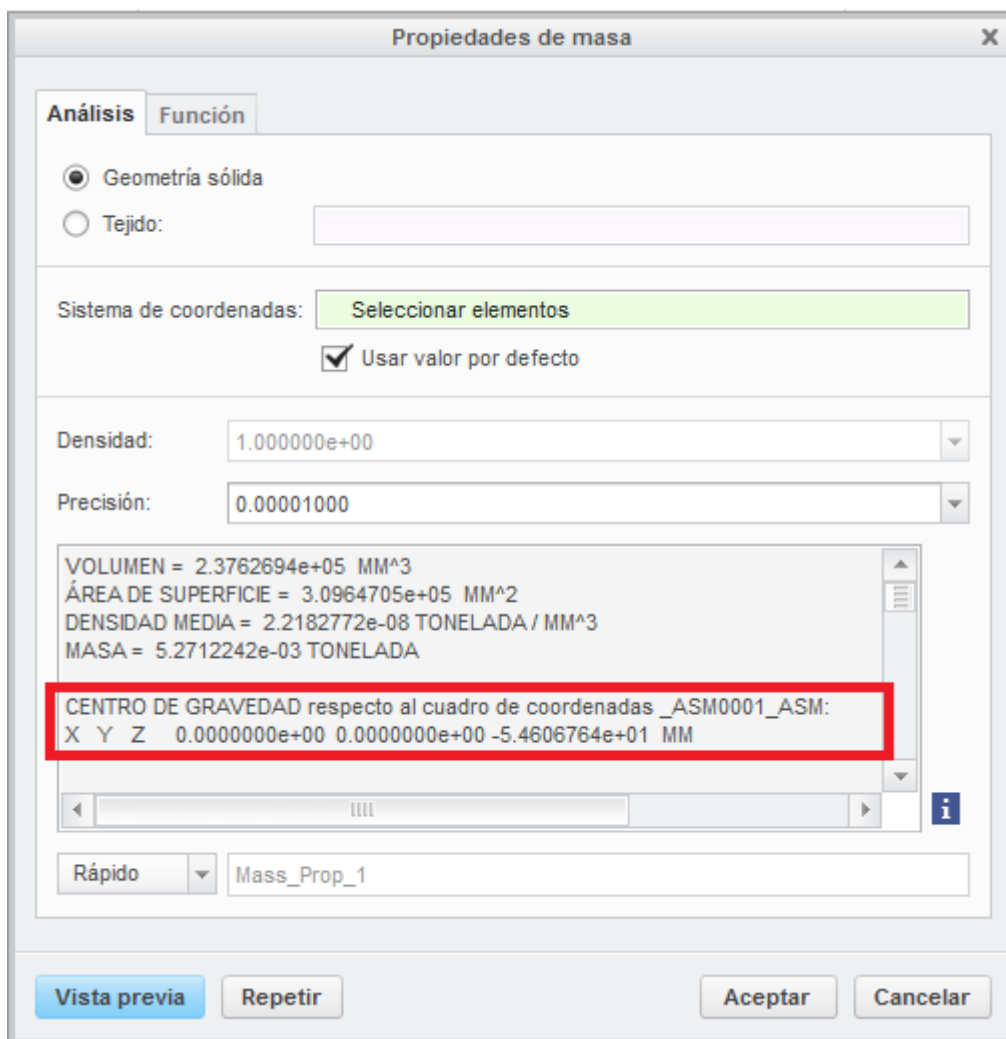


Fig. 3.23. centre de masses amb programa CAD.

El fet de tenir el centre de gravetat de l'eix Z a -54.6mm és un fet molt positiu per el disseny del multicòpter ja que com més per sota estigui el centre de gravetat més fàcil serà tenir un vol controlat. Per tant, al tenir el centre de gravetat al punt X=0, Y=0 i Z=-54.6mm podem dir que en qual a vol no ens portarà problemes per desviacions del centre de masses.

### **3.4.2. Pes de l'estructura dissenyada:**

Peces	Densitat (g/cm3)	Volum (cm3)	Quantitat	Pes
Placa principal	2,7	16,14	2	43,6g
Braços	2,7	12,5	6	33,84g
Suport del tren d'aterratge	1,25	16,04	2	20,05g
Peu tren d'aterratge	1,25	10,73	2	13,41g
Placa suport bateria	2,7	26,77	1	72,3g
Placa guia braços	2,7	5,14	1	13,9g
Suport motor	2,7	1,18	6	3,2g
Separador	1,25	1,375	4	1,7g
Barra carboni cilíndrica	1,8	6,08	2	10,96g
Barra carboni quadrada	1,8	9,945	2	17,9g
<b>TOTAL</b>				<b>527g</b>

Taula 9. Propietats físiques del PLA.

El pes total del multicòpter és de 527 grams. Com sabem el pes en un vehicle aeri és una de les parts més crítiques, però donem aquests valors com a bons ja que moltes de les estructures que es podrien trobar al mercat amb aquestes dimensions estan molt a prop d'aquest pes, i es creu que no serà difícil de equilibrar aquest sobrepès amb els components electrònics.

### **3.5. Càlcul de resistència de les peces.**

Un cop s'ha calculat el pes de l'estructura, s'ha estimat utilitzant valors normals d'alguns elements en el mercat i alguns valors reals de materials ja escollits, i s'ha arribat a establir un pes final estimat del nostre multicòpter de 3kg.

Un cop conegut el pes podem saber les forces que s'aplicaran en el multicòpter. Amb aquestes forces es podria procedir a fer un càlcul manual de resistència i elasticitat de materials.

No obstant, se sap que la deformació d'una peça i els esforços aplicats en aquesta van directament relacionats amb la morfologia d'aquesta peça. En el nostre multicòpter les forces aplicades que són més crítiques són les de flexió, i algunes axials per el tren d'aterratge.

Se sap que en forces axials, l'esforç es pot calcular de la forma de l'equació 11 on P és la força aplicada, i A és l'àrea.

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{dP}{dA} \quad (11)$$

I aplicant la llei de Hooke que diu que l'esforç és producte del mòdul de Young per la deformació.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (12)$$

Per tant, podem deduir que la deformació és la divisió entre la força multiplicada per la longitud de la peça, dividit entre la multiplicació de l'àrea de la secció d'aquesta per el mòdul de Young.

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (13)$$

De cara el que fa a les forces de flexió sobre un dels eixos, sabem que l'esforç es calcula

$$\sigma = \frac{Mf_{maxy}}{W_y} - \frac{Mf_{maxz}}{W_z} \quad (14)$$

On  $M_f$  és el moment flector, i  $W$  és el mòdul resistent que va donat segons la forma de la peça.

Com abans, la deformació depèn també de la llei de Hooke que podem observar a l'equació 12, aplicant el mòdul de flexió del material.

Per tant, mirar la morfologia de les peces s'ha vist que en algunes el càlcul es podria fer sense molts problemes com en el cas dels braços. Tot i això al veure que en gairebé totes les altres peces el càlcul es tornava molt complicat s'ha decidit realitzar el càlcul amb un programa de CAD amb el qual trobarem uns resultats molt més exactes.

Per a realitzar el càlcul s'ha de tenir en compte que no sempre les forces aplicades en el nostre multicòpter seran les que serien en vol normal. Per això s'ha decidit multiplicar al força teòrica en cada part de les peces en les quals es realitza el càlcul per quatre en l'estructura més crítica i per dos en parts no tan crítiques pel que refereix el vol. D'aquesta manera ens assegurem que si en algun moment el multicòpter rebés un conjunt de forces més grans com podria ser un cas de mal aterratge o fins i tot de sobrecàrrega de pes o estavellament tenir més controlat el resultat. A més d'aquesta manera ens assegurem un coeficient de seguretat molt més alt i una estructura molt més resistent.

### **3.5.1. Conceptes basics d'utilització del programa:**

Per realitzar l'estudi mecànic s'ha utilitzat l'aplicació SIMULATE del programa PTC creo. La idea d'aquesta aplicació o la manera d'utilitzar-se es pot complicar molt, però es poden obtenir uns bons resultats sense haver de endinsar-se molt en les funcionalitats.

Primerament el que s'ha de fer es escollir el material de la peça a analitzar, en el nostre cas alumini 6060, o PLA. Un cop fet això s'ha de establir les forces, dividides en dos grups, unes seran els punt de referencia, o punt zero, és a dir el punt on estarà fixada la peça en la nostra referencia, i les altres són les forces que faran que la nostra peça rebi una modificació respecte la referencia. En la figura 3.24 observem el perfil o braç del nostre drone amb forces aplicades de diferents colors. Les forces de color blau són les que fixen el braç, i les de color groc són les que aplicarien la força del motor.

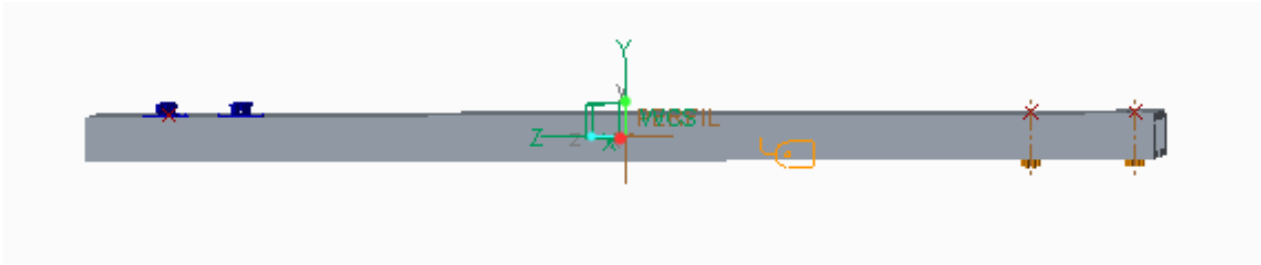


Fig. 3.24. Distribució forces aplicades a la peça.

Un cop realitzat això el que es fa és un AUTOGEM de la peça. Aquesta acció serveix per a dividir les peces en malles. Com més malles tingui la peça més precís serà el resultat. S'ha de tenir en compte que com més petita sigui la malla, més resolució tindrà el resultat, però al tenir una malla massa petita fa que el processador de l'ordinador vagi molt lent. Per aquestes causes s'ha de buscar una malla entremig que tingui prou resolució però no carregui massa l'ordinador.

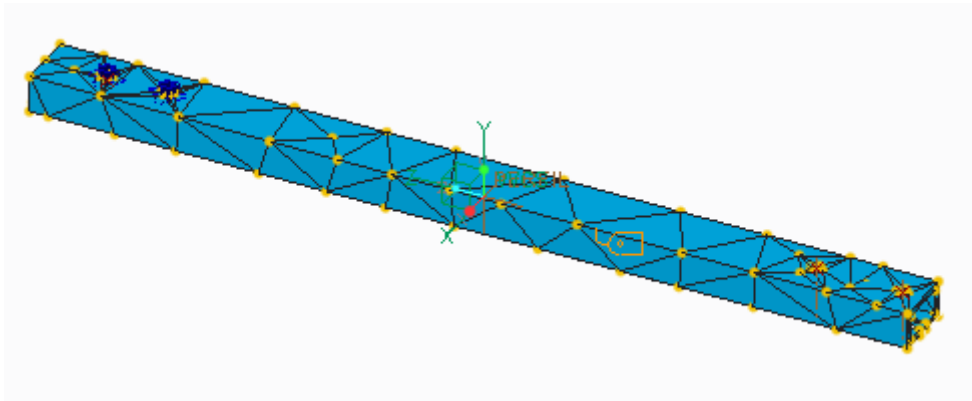


Fig. 3.25. Aplicació de la malla.

Finalment la peça està llesta per a analitzar i s'ha de crear un nou estudi sobre aquesta peça indicant els valors o magnitud que interessa a l'usuari. S'ha de comentar que els resultats no són 100% reals, ja que el programa té limitacions però ens dona una idea molt exacte del que passarà a la pràctica.

### 3.5.1.1. Braç:

Per a realitzar aquest anàlisi mecànic s'ha estudiat 2 opcions, la primera opció, és la més crítica i més irreal. Aquesta opció marca el punt de suport al extrem del perfil, i la força que farien els motors a l'altre extrem del perfil. Aquesta opció s'ha descartat ja que el fet de que les forces es reparteixin només en les superfícies perpendiculars a la màxima longitud del perfil, fa que els resultats siguin molt crítics.

Finalment s'ha realitzat el següent procediment: S'ha fixat el punt de referència o la subjecció en els forats que van enganxats a la placa principal, i s'han establert les forces en els forats on van collats els motors

- Força realitzada per cada forat de subjecció del motor:  $2.5N = 250g$ .
- Per seguretat s'ha multiplicat aquest valor per 4:  $4 \cdot 250g = 1kg = 10N$  per forat.
- Amb un total de 2 forats són  $20N = 2kg$  per motor  $\cdot 6$  motors = 12 Kg de pes total per fer la prova.

Desplaçament o flexió del braç:

- Desplaçament màxim= **0.6421 mm**

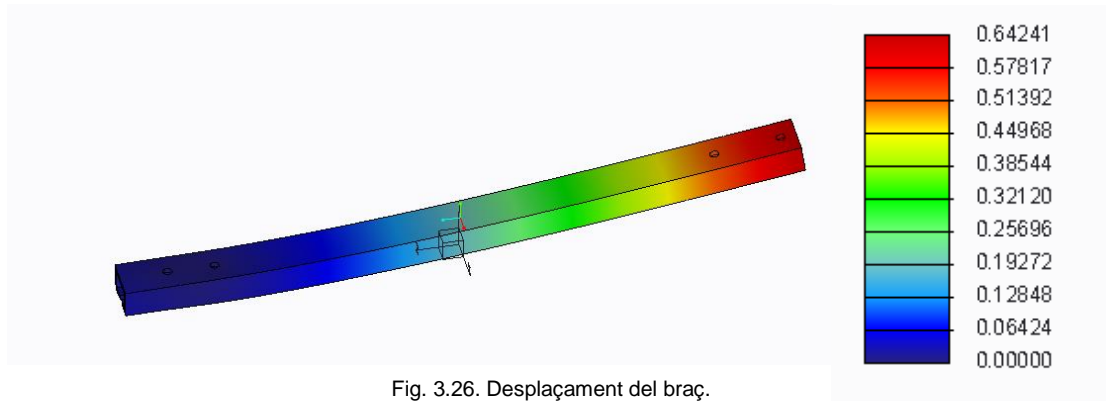


Fig. 3.26. Desplaçament del braç.

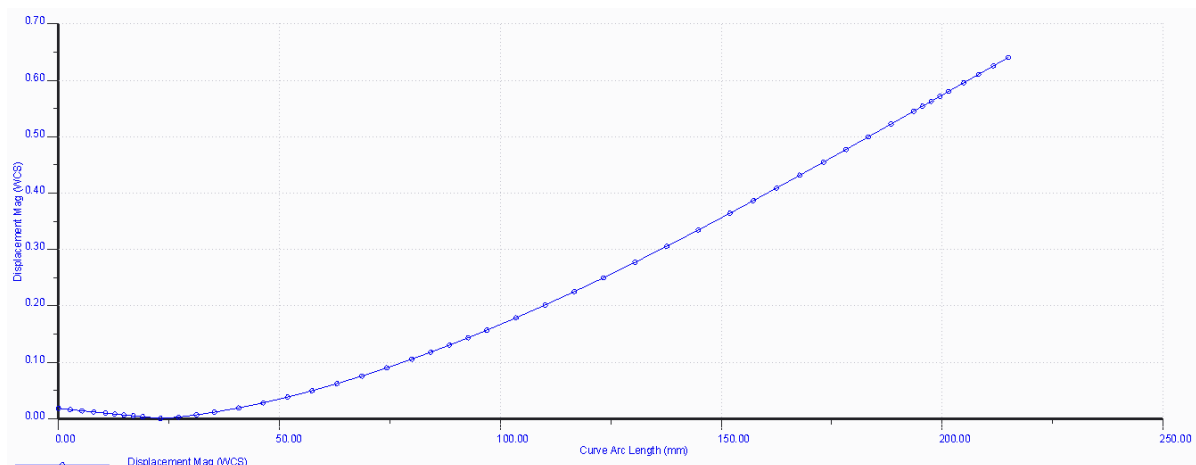


Fig. 3.27. Gràfic deformació-longitud del braç.

Com mostren les figures 3.26 i 3.27, la flexió del braç augmenta des de el punt fixat al punt a on s'aplica la força amb una tendència lineal des de una quarta part de la longitud del perfil. Es creu que el resultat màxim de 0.6421mm no és crític ja que és una molt petita desviació que s'ha de poder anivellar per la placa controladora. A més a més s'ha de tenir en compte que s'ha aplicat un cas extrem on el pes aplicat és 4 cops el pes del nostre vehicle.

Per analitzar els punts de la barra on s'aplica més esforç, s'ha observat 2 punts que són més elevats que en la resta de la peça, un és el punt de fixació amb el cargol, i l'altre és en la superfície inferior del perfil el punt on la diferència de desplaçaments és més gran, és a dir el punt on fa més corba. Aquest s'ha considerat com el més crític ja que és el punt on el material s'estira més. Aquest punt està situat a l'altura del forat de fixació que està a la dreta de la figura 3.28, i en la part inferior de la peça, figura 3.29. Per tant ens fixarem més en el segon cas, ja que tot i que el resultat marca com a més crític el forat, ho hem considerat com a un error del programa, a més de que no solament anirà fixat amb els cargols, sinó que la força es repartirà en una placa a sobre dels cargols.

- Esforç màxim del braç en el punt de fixació = **90Mpa**

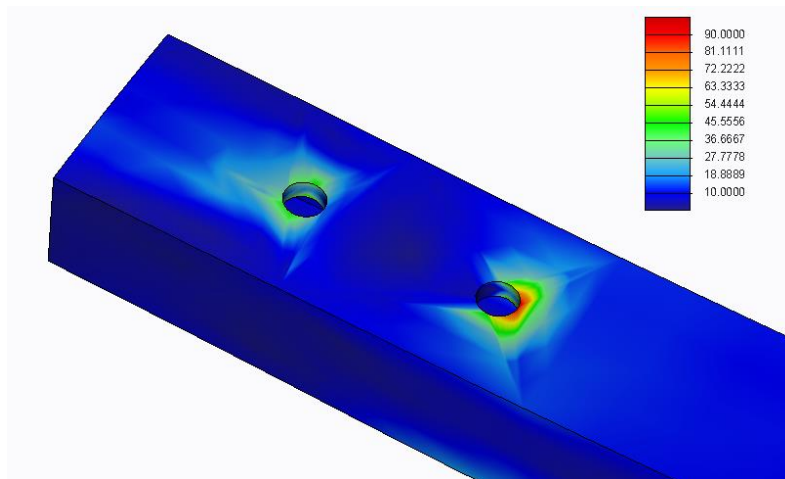


Fig. 3.28. esforç màxim en els forats.

- Esforç màxim del braç en el punt considerat com a crític = **20Mpa**

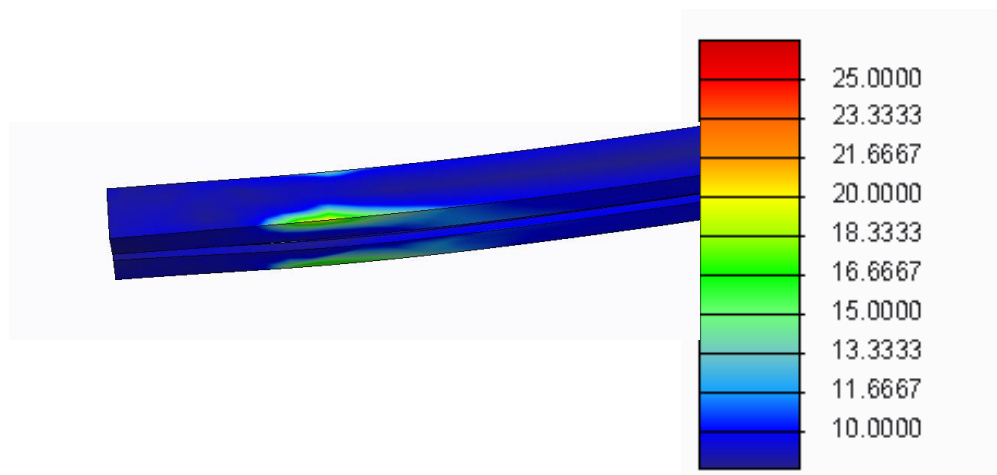


Fig. 3.29. esforç màxim en el punt més crític del braç.

Com s'ha vist anteriorment el límit elàstic de l'alumini 6060 és de 110Mpa i el límit de ruptura és de 150Mpa, per tant tot i tenint en compte el cas descartat del forat, el material aguantarà sense problemes ja que la diferència és molt gran,

### 3.5.1.2. Placa principal:

Per calcular la deformació i l'esforç màxim de la placa principal, s'han estudiat dos maneres, una s'ha considerat com a més real i la altre com a més crítica. En la més real la idea és fixar la placa per el seu centre, i establir vectors de força en les superfícies dels forats on van collats els braços. Aquests vectors de força són com en el cas anterior 10N per forat, és a dir una força total realitzada per els braços de 20N = 2kg. En el cas més crític, el punt de fixació és el mateix però l'aplicació de la força de 20N està aplicada en el punt més allunyat del centre per d'aquesta manera tenir controlat els resultat si en algun cas la força fos aplicada per temes de flexió en l'extrem de la peça.

Força aplicada en els extrems:

- Deformació màxima = **0.92431mm**

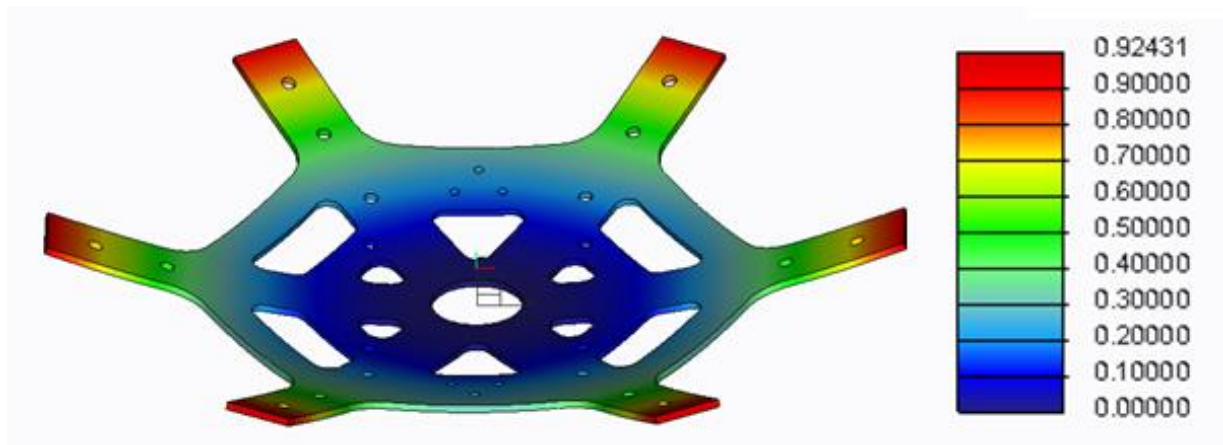


Fig. 3.30. Deformació màxima de la placa principal.

La deformació en aquest cas és bastant gran, 1mm es podria considerar un problema, tot i així la placa controladora hauria de poder equilibrar aquest error i no tenir problemes. S'ha de tenir en compte que aquest cas és el més crític i en la realitat no hauria de ser així ja que la força es repartirà entre l'extrem i els dos forats. A més a més s'ha de recordar que totes les forces han estat augmentades per quatre per seguretat.

Per el que fa a l'esforç màxim aplicat en aquesta placa amb la força aplicada els extrems es veurà reflectit a la figura 3.31.

- Esforç màxim= **35.8698Mpa**

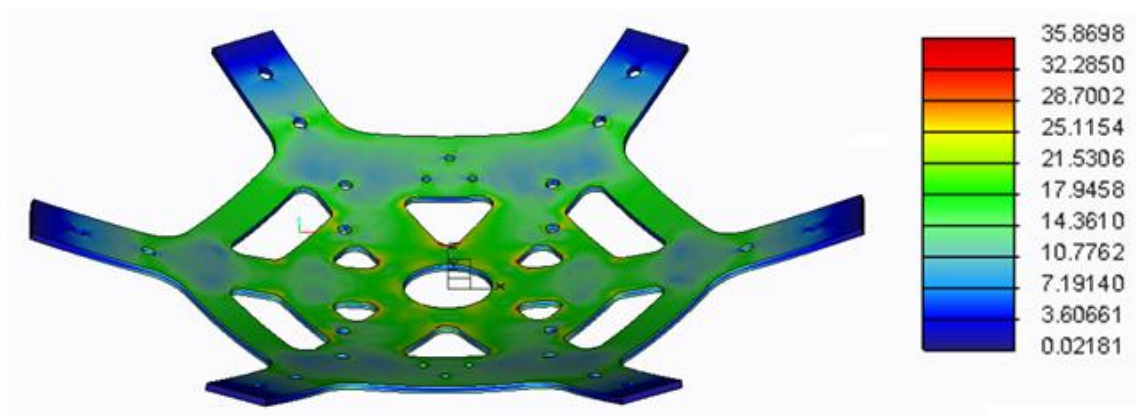


Fig. 3.31. Esforç màxim de la placa principal.

Es pot observar en la figura 3.31 que en aquest cas l'esforç està molt repartit per tota la superfície de la placa. Això es degut a que és una placa poc uniforme amb moltes ranures. Com observem els punts més crítics són els que estan a prop del centre ja



que el moment és més gran, les formes amb angles petits i les superfícies més estretes. Tot i això tenint en compte els màxims de 35.9Mpa en els punts més centrals amb angles aguts, es pot dir que la placa aguantarà sense cap mena de problemes, ja que el seu límit elàstic és de 110Mpa i el límit de ruptura de 150Mpa.

En el cas que hem declarat com a més real, el resultat és el següent:

- La deformació màxima als extrems de la peça= **0.29977mm**

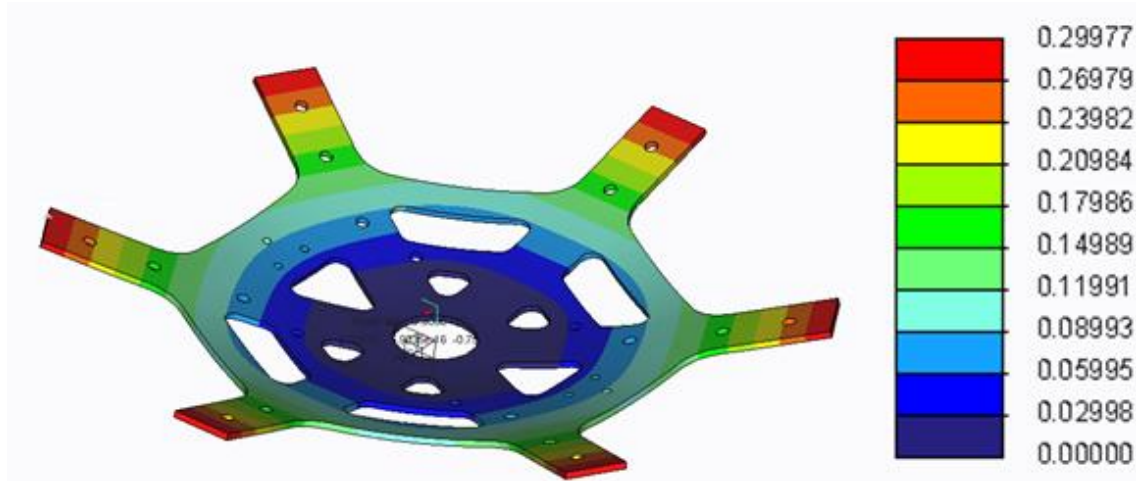


Fig. 3.32. Deformació màxima de la placa principal.

Com observem en la figura 3.32, la deformació en aquest cas és menys de la meitat que en el cas anterior, per tant la placa compleix les condicions per a un vol correcta. Aquest canvi és principalment degut a que el moment realitzat és un dels principals factors per el càlcul de la deformació i es calcula multiplicant la força per la distància. En aquest cas tenim dos distàncies diferents, les dues menors a l'anterior i una força repartida entre les dos distàncies.

L'esforç màxim d'aquesta peça s'observa a la figura 3.33= **15.0416Mpa**

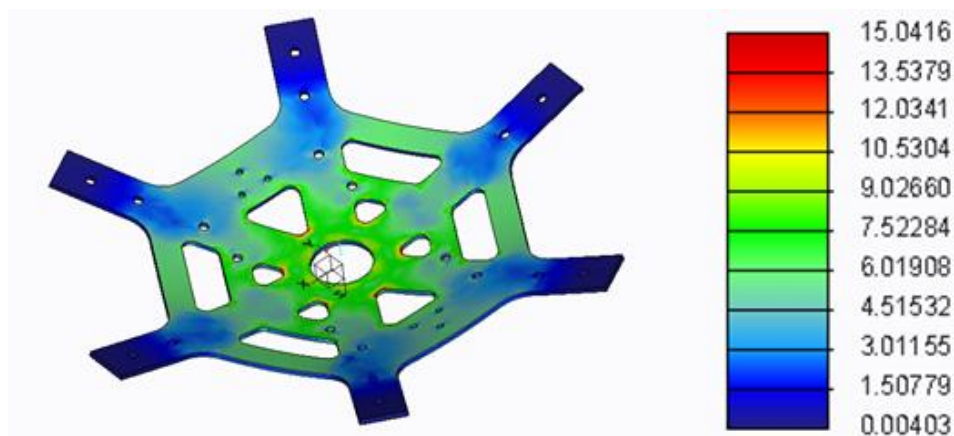


Fig. 3.33. Deformació màxima de la placa principal.

S'observa en la figura 3.33, com en el cas anterior que les zones més crítiques són les més properes al centre i amb angles tancats. En aquest cas s'observa però que l'esforç és menor, amb un valor de 15.0416Mpa. Tenint en compte que el límit elàstic



d'aquest alumini és de 110Mpa i el límit de ruptura és de 150Mpa la peça complirà les especificacions.

### 3.5.1.3. Suport del tren d'aterratge amb la placa principal.

Aquesta peça per la seva complexitat s'ha imprès amb PLA. El que s'ha fet és mantenir fixada la peça per la superfície dels forats i les dos superfícies perpendiculars a aquestes, llavors s'ha aplicat una força al cilindre a on anirà enganxada la barra de carbono en sentit de la força del pes. La força aplicada en la superfície és de 30N que és el doble del que teòricament ha d'aguantar el nostre drone ja que com que la força es divideix en els dos peus, cada peu hauria de aguantar 15N de força si el drone té un pes de 6kg. En aquest cas s'ha disminuït l'índex de seguretat ja que la funció de totes les peces impreses en 3D no tenen relació directa en la qualitat de vol del multicòpter.

- Deformació màxima= **0.01971mm**

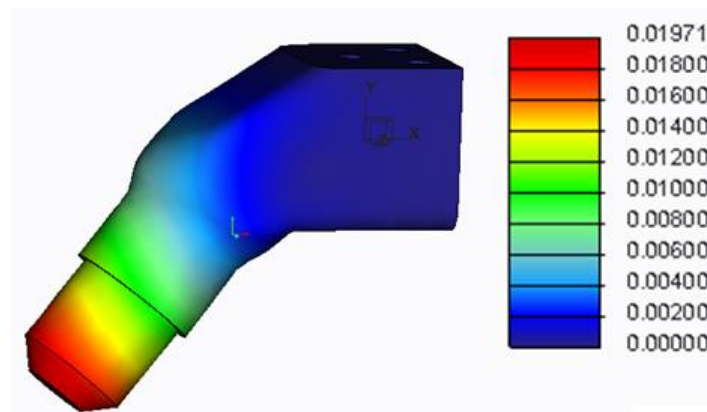


Fig. 3.34. Deformació de la junta de la placa principal amb la barra de carbono.

Com s'observa a la figura 3.34, la deformació màxima és en el punt més allunyat del cilindre és de 0.01971mm. Per tant podríem dir que és negligible en el nostre cas. Aquest resultat era d'esperar, ja que tot i que el PLA és un material molt flexible la morfologia de la peça i les dimensions d'aquestes fan que el resultat de deformació sigui molt inferior a les vistes anteriorment.

- Per el que fa a l'esforç màxim= **3.57011Mpa**

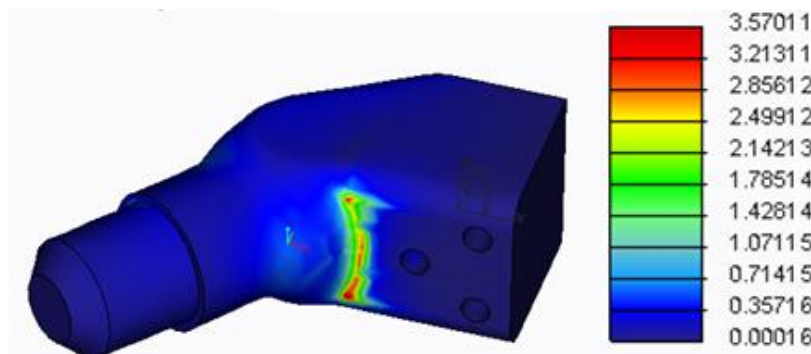


Fig. 3.35. Esforç de la junta de la placa principal amb la barra de carbono.

Com s'observa en la figura 3.35 l'esforç màxim és aplicat aproximadament en l'índex de l'angle entre l'espai de suport a l'estructura i el cilindre. Aquest valor és de 3.57Mpa i tenint en compte que el PLA, que és el material que està feta la peça es pot tractar com un plàstic derivat del petroli, amb unes condicions de límit de ruptura a flexió de 80Mpa i límit de ruptura a tracció de 50Mpa podríem dir que la peça aguantarà sense problemes.

Tot i així cal comentar que la peça no tindria aquestes condicions reals ja que al estar impresa en 3D el seu interior té espais buits i queden moltes ranures i fissures que fan que la resistència de la peça baixi molt considerablement. Tot i així tenint en compte que s'ha multiplicat per 2 el pes i que el marge és molt gran de 50-80Mpa a 3.5Mpa es dona la peça com a vàlida.

#### 3.5.1.4. Peu del tren d'aterratge.

En l'última peça estudiada, també impresa en PLA, el procediment ha estat molt semblant a l'anterior. S'ha fixat la peça per la part que tocarà al terra, aquesta part és la inferior del quadrat que s'observa a la figura 3.36. Llavors s'ha aplicat una força de 30N en la direcció del pes en la superfície cilíndrica on anirà enganxada la barra de carboni.

S'ha de comentar com en el cas anterior, que al ser una peça impresa amb 3D les propietats de la peça disminueixen dràsticament i el resultat de l'anàlisi no podrà ser del tot precís

Veiem en la figura 3.36 que la deformació màxima és= **0.02596mm**

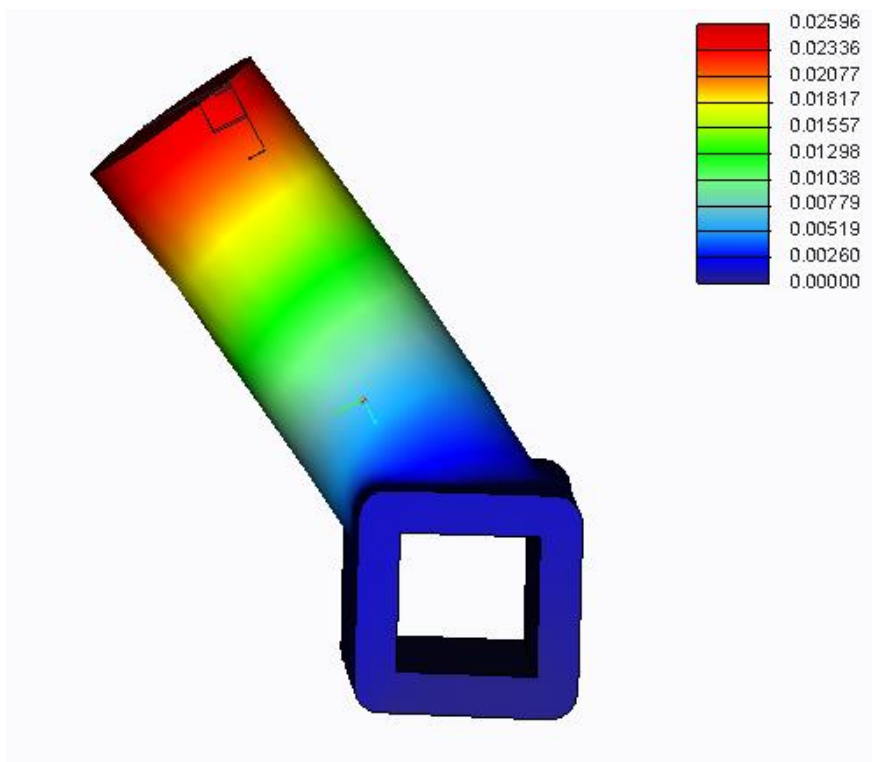


Fig. 3.36. Deformació de la junta entre barra cilíndrica i rectangular.

Com a resultat, s'observa a la figura 3.36 que la deformació màxima augmenta en el cilindre fins arribar a 0.026mm. Aquest resultat per la finalitat de la peça es negligeix ja que la peça complirà al 100% la seva funcionalitat que és aguantar l'estructura i no intervé en la funcionalitat i estabilitat de l'estructura principal del drone.

- Esforç màxim de la peça és = **1.91446Mpa**

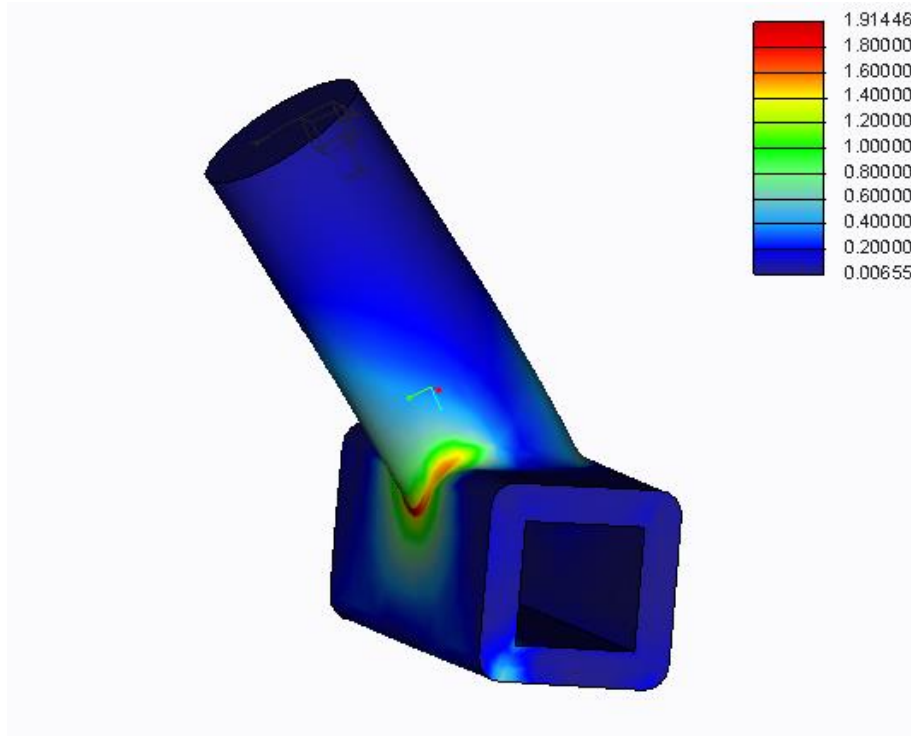


Fig. 3.37. Esforç de la junta entre barra cilíndrica i rectangular.

Com s'observa en la figura 3.37 l'esforç màxim és aplicat aproximadament en l'índex de l'angle més petit entre quadrat de suport i el cilindre. Aquest valor és de 1.914Mpa i tenint en compte que el límit de ruptura a flexió de 80Mpa i límit de ruptura a tracció de 50Mpa podríem dir que la peça aguantarà sense problemes. També cal comentar com en el cas anterior que la peça no tindria aquestes condicions reals ja que al estar impresa en 3D al resistència de la peça baixa molt considerablement. Tot i així tenint en compte que s'ha doblat el pes i que el marge és molt gran de 50-80Mpa a 1.914Mpa es dona la peça com a vàlida.

Per últim, cal comentar que tant en aquesta peça com en la peça anterior, s'ha fet un càlcul de propietats mecàniques aplicant les forces tenint en compte un aterratge correcta. Si l'aterratge no és correcta, llavors entren en joc forces de torsió i altres que no podem controlar que farien que les peces dissenyades estiguessin en perill de ruptura.

### **3.6. Confecció de l'estructura:**

Un cop s'ha assegurat que l'estructura dissenyada per el nostre drone és l'adequada, s'ha procedit a construir-lo, és a dir agafar les matèries primeres i treballar-les per aconseguir l'estructura desitjada.

Primerament s'ha treballat amb l'alumini. Per treballar amb l'alumini hem utilitzat la fresadora ubicada al taller de la universitat de Vic, i s'ha treballat amb una placa d'alumini de 1.5mm de gruix. Per a treballar amb la fresadora primerament s'ha hagut de fer uns passos previs ja que aquestes són màquines de control numèric. El control numèric és un tipus de llenguatge que dona bàsicament ordres com coordenades dels eixos horitzontals i verticals per així moure l'eina de treball correctament, ordres de velocitat i ordres generals de la màquina.

Els passos a seguir són els següents:

- S'ha hagut de convertir el fitxer de creu a DXF, ja que el programa per traduir el llenguatge a control numèric només admet fitxers 2D.
- Obrir fitxers amb el programa *VCarve pro* i definir les poli-línies que es vol traduir a control numèric. També s'ha establert en aquest mateix programa la profunditat de passada, les eines utilitzades, llengüetes de seguretat, nombre de passades etc...
- Un cop determinat tots els elements necessaris obtenir el codi G (CN) per enviar-lo a la màquina.
- Per enviar el codi a la màquina s'utilitza un altre programa, en el qual es marquen els límits, els punts zero de la peça, correccions de longitud de les eines i velocitats.

Un cop fet tot aquest procediment ja es pot començar a fresar les peces desitjades. S'ha d'anar amb compte a tenir la placa d'alumini ben subjectada, i absolutament paral·lela al moviment en el XY de la màquina. Això s'ha aconseguit posant anteriorment una fusta i fent un rebaixat a aquesta de tal manera que ens assegurem que la superfície es totalment paral·lela al pla XY, posteriorment s'ha fixat l'alumini a sobre aquesta fusta rebaixada. Per fer tot el procés de fresat s'ha hagut de portat tot el material necessari de seguretat, com són les ulleres, i guants per la manipulació de les plaques.

Seguidament veiem en les figures 3.38 i 3.39 parts del procés:

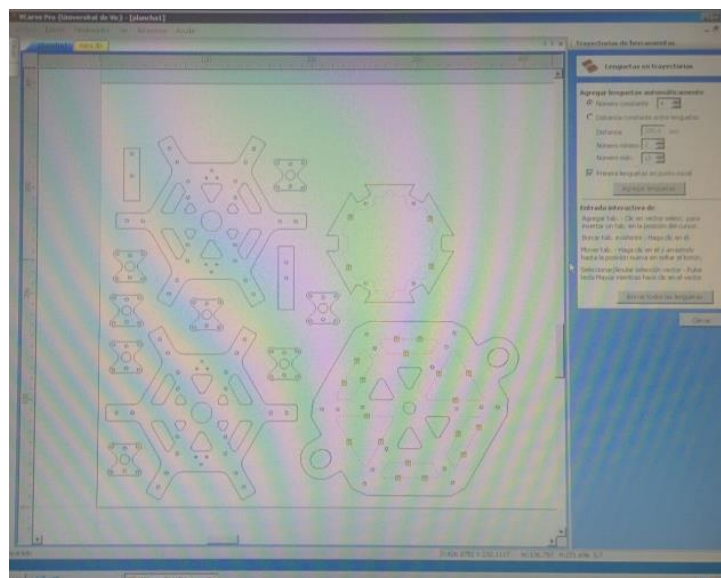


Fig. 3.38. Distribució de les peces en el programa VCarve.

Veiem en la figura 3.38 la distribució que s'ha seguit per fresar les peses en la placa d'alumini en el programa VCarve. S'ha tingut en compte de deixar unes distàncies mínimes entre peses per seguretat, tot i que sempre s'intenta posar el màxim de juntes possible totes les peces, ja que d'aquesta manera la màquina estalviarà en temps de fabricació i material.

En la figura 3.39 observem el procés de fresat. En aquesta figura s'observa la fusta anivelladora de la placa, la subjecció d'aquesta i l'eina de 6mm de fresat. Veiem també el tub de refrigeració de l'eina, aquesta és una part molt important de tenir en compte ja que si l'eina s'escalfa massa es pot trencar i haver de repetir tot el procés.



Fig. 3.39. Procés de fresat.

Totes les peces han estat repassades a mà per tal de assegurar la màxima perfecció en el fresat d'aquestes.

Seguidament s'ha procedit a realitzar els braços del nostre multicòpter, per fer-ho s'ha comprat un perfil d'alumini de 1.5 metres de llargada i s'han tallat manualment a la mida exacta degut a la poca secció que tenien. Un cop fet això s'han marcat els forats amb una placa guia que s'ha fresat anteriorment i s'han realitzat amb una broca de 3mm amb el trepant.

Acabat tot el treball amb alumini es procedeix a construir el tren d'aterratge. Primerament s'ha agafat les barres de carboni cilíndriques de 16mm de diàmetre i 330mm de llargada que s'ha comprat i es procedeix a tallar-les. S'ha d'anar molt en compte a l'hora de tallar el carboni ja que la pols que desprèn és perillosa. Ens hem posat mascaretes de seguretat i ulleres i s'ha tallat amb el Dremel amb la velocitat adequada per no fracturar el cilindre. Aquest procés es pot visualitzar en la figura 3.40.





Fig. 3.40. Tall de la barra de carbono.

Finalment, la part més complicada per confeccionar el tren d'aterratge és la impressió de les juntes del tren d'aterratge amb la impressora 3D. Es considera una de les parts més complicades perquè s'ha de tenir en compte que moltes peces no poden ser impreses per la seva morfologia, a part de que s'han hagut de fer suports a les peces per tal de que aquestes no es tombin mentre s'han anat imprimint.

La impressió 3D és un procés simple d'entendre, es tracta d'un procés de fabricació per adició on un objecte tridimensional és creat mitjançant la superposició de capes successives de material. tot aquest procés està manat per un controlador que envia ordres de control numèric com en el cas anterior de la fresadora. Per tant, s'ha d'agafar el disseny 3D de CAD i passar-lo a un format adequat per la impressora 3D.

El primer pas per realitzar aquest procés ha set agafar les peces dissenyades amb CAD, i passar-les a format STL. Aquest format utilitza una malla tancada de triangles, com més petits siguin els triangles que defineixen l'objecte més resolució tindrà la peça. S'ha de tenir en compte que com més petits són els triangles més pesarà el fitxer, per tant, és aconsellable arribar a un entremig.

Un cop fet això es passa la peça per un "SLICER" que és un programa el qual et divideix la peça en les passades que farà l'extrusor donant informació en cada passada del que ha de fer la màquina, aconseguint d'aquesta manera el codi G que ja podrà ser enviat a la impressora. Amb un "SLICER" és possible triar diferents opcions, com pons de subjecció de parts, mida de la capa de material i la manera d'omplir la peça entre altres, ja que per defecte les peses impreses amb aquesta tecnologia no són del tot sòlids plens, ja que per estalviar temps i material, creen estructures mallades en el seu interior.

Un cop s'aconsegueix el codi G per la impressió el que s'ha de fer és preparar els paràmetres de la màquina, i enviar el codi. S'ha d'anar en compte durant la impressió de les peces i no deixar la màquina treballar sola sense una persona al càrrec vigilant el procés.

S'observa en la figura 3.41 una de les peses que s'ha imprès en 3D.

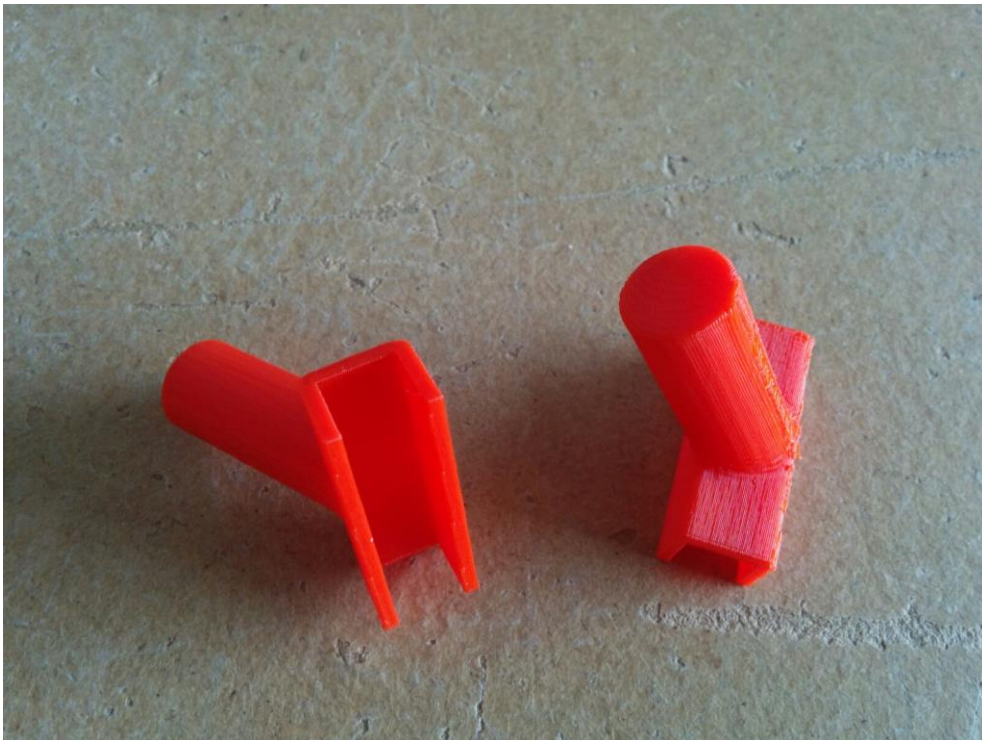


Fig. 3.41. Peça 3D impresa juntament amb la barra de carboni.

Un cop aquestes peces han estat impreses s'han hagut de treballar, per aconseguir uns bons acabats. El primer que s'ha fet ha set llimar parts de la peça amb fibra de vidre ja que per construir les peces s'ha utilitzat ponts o suports perquè no caiguessin mentre s'imprimien. Aquests ponts però quan s'ha acabat la impressió s'han de treure perquè en aquest cas es necessari que parts de les peces tinguin les mides exactes com per exemple en la figura 3.41, el diàmetre del cilindre s'ha hagut de llimar ja que sinó no entrava en l'orifici de 14mm de la barra de carboni.

# Capítol 4

## Electrònica del multicòpter

### 4.1 Elecció del material electrònic

Per assegurar que el nostre drone volarà és vital calcular i escollir correctament els components que muntarem, això serà la base i condicionarà tot el projecte. És per això que volem posar èmfasi en aquest aspecte i remarcar que no cal escatimar en temps ni components, no es pot anar a la lleugera, tot ha de tenir una justificació.

#### 4.1.1 Procediment d'elecció:

Creiem que és necessari tenir unes pautes i passos per escollir els materials:

- ✓ Escollir el millor tipus i configuració ideal de l'estructura (quad +, quad x, quad h, hexa +, hexa x, octo +, octo x, ...). Depenent de l'ús que li vulguem donar necessitarem una estructura simple i lleugera (acrobàcies,...) o bé robusta i més pesada (gravació d'imatges, tasques de rescat, ...).
- ✓ Calcular el pes total del del drone amb l'electrònica inclosa.
- ✓ Calcularem el pes que ha d'aixecar cada motor.
- ✓ Seleccionarem el motor que compleixi amb l'empenta necessària (thrust) tenint en compte el seu pes i característiques.
- ✓ Sabent l'amperatge màxim que necessitarà el motor buscarem un ESC (controlador de velocitat del motor) que estigui per sobre d'aquest amperatge.
- ✓ A partir del voltatge que necessitarà el motor sabrem de quantes cel·les ha de ser la nostra bateria (paràmetre S).

Aquests seran els principals components del drone, posteriorment seleccionarem el controlador i diferents accessoris que vulguem instal·lar en aquest.

#### 4.1.2 Esquema general del sistema:

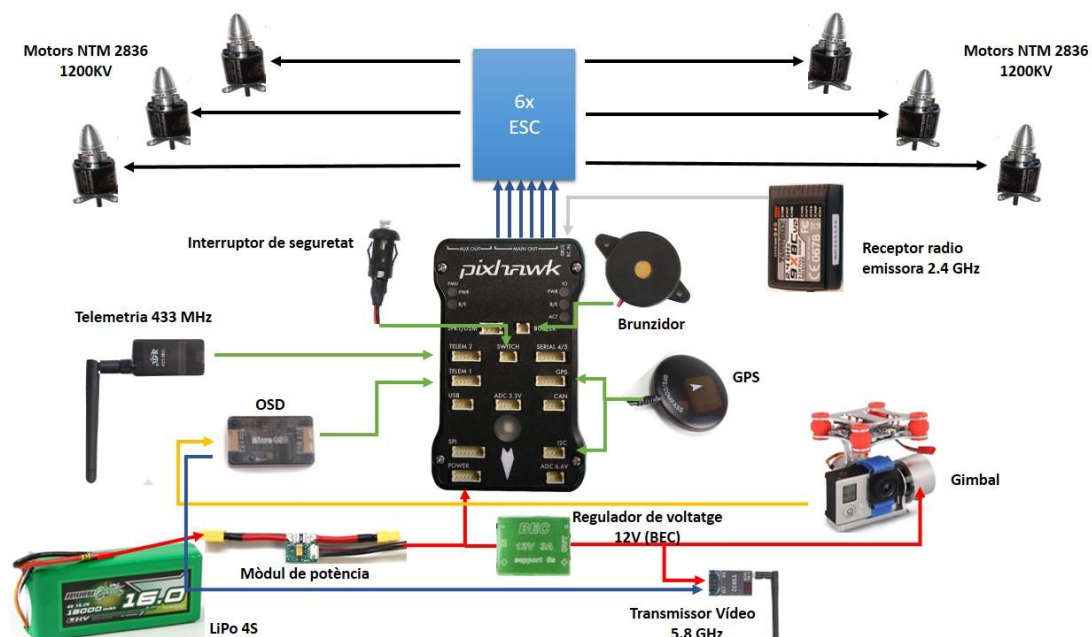


Fig. 4.1. Esquema general del sistema amb totes les peces que hem comprat.



## 4.2 Sistema de propulsió

### 4.2.1 Motors

Els motors són una de les parts essencials i en la qual hem de pensar bé per tal de fer una bona elecció.

En el cas dels multicòpters els motors més utilitzats, per no dir els únics, són els motors “brushless” els quals no contenen escombretes.

#### Motors amb escombretes vs. “Brushless”

Un motor amb escombretes té un conjunt de bobines rotatòries que actúen com un electroimant amb dos pols. Un commutador inverteix la direcció del corrent elèctric dues vegades cada cicle, de manera que els pols de l'electroimant tiren i empenyen els imants. Durant l'instant de la commutació de polaritat, la inèrcia manté el motor en la direcció adequada.

Un motor sense escombretes utilitza un rotor extern amb imants permanents, tres fases de bobines, un o més dispositius per detectar la posició del rotor, i l'electrònica d'accionament associada. Les bobines s'activen, una fase després de l'altra dirigides pel controlador electrònic de velocitat.

Si observem els avantatges dels motors brushless en comparació amb els motors que tenen escombretes clarament ens decantarem pels brushless:

- ✓ Manteniment baix, no contenen escombretes o commutadors que es desgastin.
- ✓ Eficiència més alta, per tant, tindrem majors temps d'operació.
- ✓ Velocitat més altes

Els desavantatges serien que són més cars i necessitem controladors de velocitat més complexes per alimentar els motors, tot i això, no són gaire inconvenient en comparació als avantatges que aconseguim.

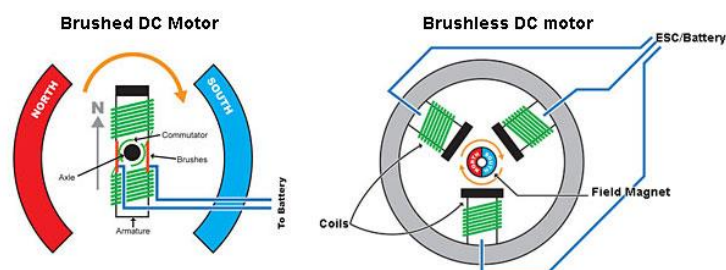


Fig. 4.2. Esquema motor amb escombretes i sense escombretes.

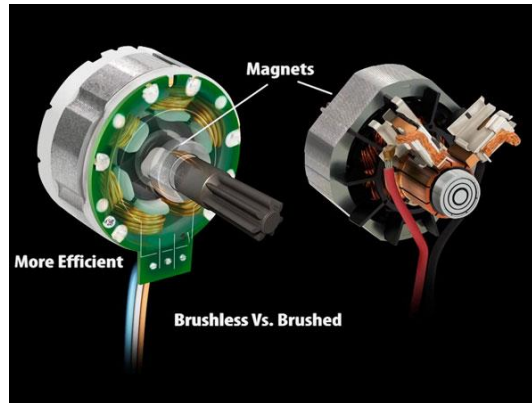


Fig. 4.3. Esquema motor sense escobretes.

Un motor genera potència, que és un concepte diferent a l'empenta . L'empenta depèn del tipus d'hèlix que estiguem utilitzant , i cada motor sol acompanyar-se d' unes dimensions recomanades a utilitzar.

### Motors Inrunners vs Outrunners

Hi ha dues categories de motors sense escobretes. La diferència entre els dos és que els outrunners tenen el rotor a la zona exterior del motor, i els motors Inrunner tenir la part giratòria a l'interior mentre que la capa exterior es manté estacionària. Els motors Inrunner s'utilitzen sovint amb els cotxes R/C, ja que poden girar molt més ràpid que els motors outrunner. No obstant això els motors outrunner són capaços de produir més parell cosa que els permet conduir hèlixs més grans com serà el nostre cas.

### OUTRUNNER COMPONENTS

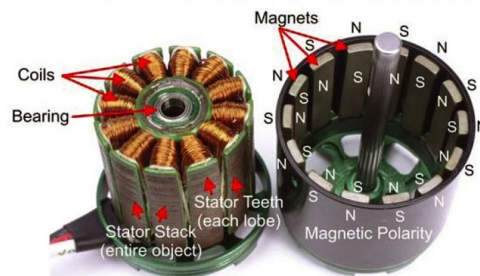


Fig. 4.4. Components motor outrunner.

### Significat KV motors

Aquest nombre depèn de molts factors :

- Nombre d'espines
- Diàmetre del fil de coure utilitzat en el bobinat.
- Potència dels imants.
- Geometria del motor.

El valor expressat en KV es refereix a la constant de revolucions d'un motor, el nombre de revolucions per minut ( rpm ) que serà capaç d'oferir-nos quan se li apliqui 1V ( 1 volt ) de tensió.

$$K_v = \frac{Speed}{Volts * 1.414 * 0.95}$$

**Nota:** No confondre KV amb kV ( quilovolt ).

### Relació entre KV i usos

#### ➤ **KV Alts**

El nombre d'espines és menor, per tant , el fil de coure és més gruixut. L'amperatge que circularà pel motor és superior als motors de KV baixos.

Recomanat per a drones de carreres, aparells que necessiten poc parell i molta velocitat. Indicat per moure hèlixs de dimensions petites. Són motors molt vius, amb reacció molt violenta i gran consum elèctric.

Motors a partir de 1900KV.

#### ➤ **KV Baixos – la nostra elecció**

El nombre d'espines és més gran, per tant, el fil de coure és més fi i l'amperatge que circularà pel motor serà inferior a altres amb KV més alt.

Recomanat per a drones que necessiten molt parell i poca velocitat. Indicat per moure hèlixs de grans dimensions. Són motors menys vius, molt suaus , amb un menor consum elèctric.

Motors fins a 1900KV.

### Elecció Motors

L'elecció del motor adequat és important per a un bon rendiment en qualsevol Drone, però és especialment crític en un copter, ja que aquest està penjant a l'aire suspès dels rotors. Amb el gran nombre de motors disponibles, de diferents mides, velocitats i especificacions per a cada motor, l'elecció pot ser una tasca molt difícil.

La regla d'or en els multirotors és escollir una configuració la qual pugui elevar mínim 2 vegades el seu pes. D'aquesta manera ens assegurarem que podem mantenir el drone estacionari sense haver de mantenir el gas al màxim, amb la meitat aproximadament.

En el nostre cas com que tenim 6 motors, farem el següent càlcul:

(Pes del multicópter complet x 2) / 6 (nombre de motors) = Pes que ha d'aixecar cada motor

Hem comptat que el pes amb tot l'equip complet serà de 3000g:

$3000g \times 2 / 6 = 1000g$  / motor

Per anar bé, cada motor haurà de tenir força per aixecar mínim 1000g, tot i que per anar una mica més sobrats i tenir un marge de seguretat hauríem de tenir una empenta de 1100g o 1200g, multipliquem per un factor de seguretat de 1.1 o 1.2.

### La nostra elecció:

- Motors Turnigy NTM 2836



Fig. 4.5. Turnigy NTM 2836.

### Especificacions

Kv: **1200rpm/v**

Pols: **6**

Voltatge Max: **15V**

Corrent Max: **36A**

Potència Max: **295W @ 11.1V (3S) / 530W @ 15V (4S)**

Pes: **85g**

ESC: **30 - 40A**

N. Cel·les: **3s – 4s Lipoly**

Forats per als cargols: **16mm & 19mm**

Pas dels cargols: **M3**

Connexió: **Connector Bullet de 3.5mm**

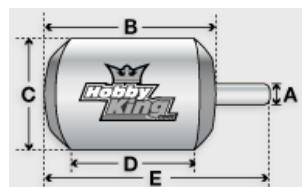


Fig. 4.6. Dimensions Turnigy NTM 2836.

Eix A: **4mm**

Llargada B: **38mm**

Diàmetre C: **28mm**

Longitud del cilindre motor D: **25mm**

Longitud total E: **56mm**

Prop Test Data:  
10x5 - 11.1V / 195W / 17.6A / 1.02kg thrust  
10x5 - 14.8V / 430W / 29A / 1.5kg thrust  
11x7 - 11.1V / 295W / 26.5A / 1.12kg thrust  
11x7 - 14.8V / 530W / 36A / 1.48kg thrust

Motors brushless (sense escombretes), alt rendiment i pes baix, depenent de la configuració del sistema es pot arribar a 1.5kg d'empenta

Com que ens interessa tenir una empenta d'uns 1.2kg veiem segons les característiques que haurem d'alimentar els nostres motors a 14.8V, pel que escollirem una **bateria 4S** (14.8V).

Veiem segons les proves del motor que pot consumir entre 29 i 36A segons les hèlix escollides, per assegurar-nos i no sobrepassar el límit escollirem un ESC de 40A.

- Accessoris muntatge motor

Els accessoris de muntatge ens permetran collar el motor al xassís del nostre multicopter així com també les hèlix.



Fig. 4.7. Accessoris motors.

### Especificacions

Diàmetre de l'eix: **5mm**  
Llargada de l'eix: **19mm**  
Pes: **13.8g (Total)**

## 4.2.2 ESC

### Què és un ESC?

L'ESC (Electronic Speed Control) és l'encarregat de variar la velocitat d'un motor o bé canviar la direcció del mateix.

Característiques:

- Cada motor disposa d'un ESC.
- Rep un senyal de polsos modulats (PWM) des del controlador i s'encarrega de generar una senyal trifàsica alterna per alimentar el motor.

- Es componen de les següents parts :
  - Dos cables : es corresponen a l'entrada d'alimentació de la bateria.
  - Tres cables : es connecten al motor per proveir-lo d'alimentació mitjançant polsos .
  - Un connector amb dos o tres cables : va connectat a la controladora, de la qual rep les dades per moure el motor. El nombre de cables dependrà de si l'ESC porta inclòs BEC (3 cables) o no (2 cables).

### Funcionament

Quan movem l'estic de l'accelerador:

- 1 - La controladora envia les dades calculades en funció de la posició del drone i de la posició de l'estic. La informació en forma de dades viatjarà a través del connector corresponent cap al ESC.
- 2 - La informació arriba al ESC. En aquest moment el variador demandarà l'energia necessària a la bateria a través dels seus cables de connexió.
- 3 - Es produeix la traducció a polsos dins de l'ESC , i es transmet al motor a través de tres connectors .
- 4 - El motor es mou.

### Elecció ESC

Bàsicament hi ha dos tipus d'ESC: OPTO i BEC

La gran diferència entre els dos tipus es tracta bàsicament en que els BEC (*Battery Eliminating Circuit*) inclouen un circuit que s'alimenta de la bateria (entrada del ESC) i regula aquesta alimentació per donar 5V de sortida, d'aquesta manera podem alimentar Servos o altres petits elements externs que hàgim de controlar. Els OPTO en canvi, no disposen de cap circuit addicional i per tant fan purament la funció de controlador de velocitat.

En el nostre cas, treballarem amb accessoris de 12V, per tant no ens és d'utilitat, per això hem optat per un ESC OPTO, d'aquesta manera estalviem pes i cost:

- ZTW Controlador de velocitat 40A "small"

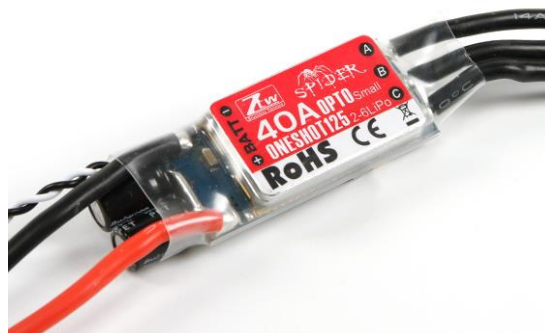


Fig. 4.8. ESC escollit.

ESC de 40A amb el firmware SimonK pre-instal·lat, aquest firmware és un dels més estables de tots: resposta ràpida però a la vegada suau i lineal.

Una altra característica d'aquest controlador és la protecció a sobrecàrregues i parada en cas de pèrdua de senyal.

#### Especificacions

Corrent constant: **40A**  
Intensitat de pic màxima: **50A**  
Voltatge d'entrada: **7.4 – 22.2V (2 – 6S Lipoly)**  
BEC: **OPTO**  
Dimensions: 47 x 20 x 10mm  
Pes: **31g**

Es pot veure la connexió dels ESC amb la placa controladora a l'annex 5.

### 4.2.3 Hèlixs

Les hèlixs són una part no menys important a l'hora d'escollir les especificacions del nostre multicòpter. Aquestes són les que faran que el drone s'elevi d'una manera determinada a partir de la força dels motors.

#### Diàmetre i Pitch (pas)

Hem d'escollir unes hèlixs que no siguin ni massa petites ni massa grans. Per molt que tinguem uns motors excel·lents, si les hèlixs no són les correctes el nostre sistema serà totalment ineficient:

- Massa petites: no tindrem prou empenta per aixecar el multicòpter.
- Massa grans: els motors hauran d'arrossegar una càrrega més gran de la que poden, això farà que consumeixin molt amperatge i es sobreescalfin provocant una fallada del sistema.

Les hèlixs es classifiquen per llargada (diàmetre) i pas "pitch". Per exemple una hèlix 9x4.7 té 9 polzades de diàmetre (228.6mm) i un pas de 4.7 polzades (119.38mm).

1 centímetre= 0,393701 polzades..

Per satisfer les necessitats del multicòpter haurem d'escollir un diàmetre que ens admeti el xassís, molt cops el propi fabricant del motor ens diu els tipus d'hèlix idonis per al nostre motor.

Pas "Pitch": és la distància que avança l'hèlix en realitzar una volta sencera sobre l'eix.

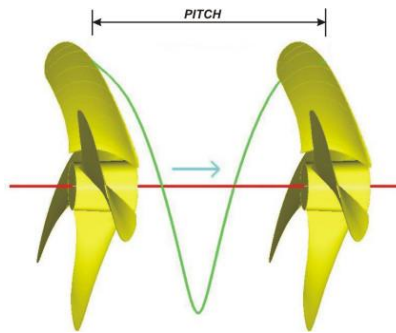


Fig. 4.9. Esquema pas de l'hèlix en una volta.

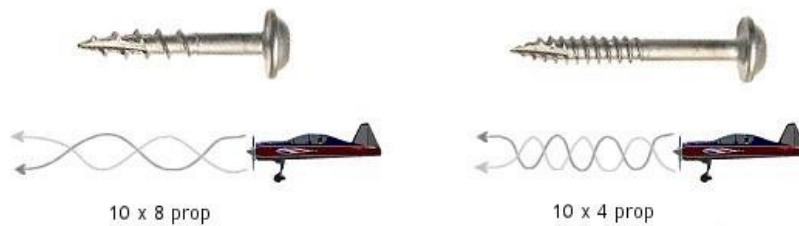


Fig. 4.10. Exemple passos d'hèlix

Quant més gran sigui el pas, més aire mourem i per tant més velocitat tindrem, tot i això, tenir un pas més gran necessita que necessitem més parell per part del motor, per tant tindrem un consum més alt.

Un pas més baix ens proporcionarà més estabilitat. No per això vol dir que sempre hàgim de seleccionar una hèlix amb un pas baix, sinó que hem de buscar un equilibri adequat entre longitud i pas.

Al mercat solem trobar hèlixs fins unes 20 polzades (508mm) i amb passos fins a 10 polzades (254mm).

En el nostre cas per limitacions de mides podíem muntar unes hèlix de màxim 9 polzades, comprovant les especificacions del fabricant dels nostres motors podem observar el següent:

**Prop Test Data:**  
 10x5 - 11.1V / 195W / 17.6A / 1.02kg thrust  
 10x5 - 14.8V / 430W / 29A / 1.5kg thrust  
 11x7 - 11.1V / 295W / 26.5A / 1.12kg thrust  
 11x7 - 14.8V / 530W / 36A / 1.48kg thrust

Fig. 4.11. Especificacions dels motors segons hèlix.

Amb hèlix de 10 polzades i un pas de 5 observem que a 14.8V que és el voltatge al qual treballarem, tenim 1.5kg d'empenta. Nosaltres en el nostre cas seleccionarem hèlixs de 9 polzades amb el mateix pas pel que no tindrem tanta empenta, segons els càlculs amb 1.2kg d'empenta tindríem marge de sobres pel que segur que no tindrem problemes. A més, amb 10 polzades s'utilitzen 29A i 430W, el motor pot subministrar fins a 530W i 36A, pel que tindrem empenta de sobres per moure el nostre multicòpter i tenir molt marge de seguretat.

Hem seleccionat un pas de 4.7 polzades ja que és un pas tirant a baix però sense quedar-nos curts, d'aquesta manera tindrem un drone estable sense tenir un consum



excessiu, per a multicopters pesats i pensats per aixecar càrregues és recomanable una configuració similar, hèlixs grans amb un pas tirant a baix per tenir naus equilibrades. Com que estem creant un drone per a realitzar gravacions, aquesta serà la configuració ideal.

### Sentit de gir

Els multicopters estan ideats per treballar la meitat de motors en un sentit i l'altra meitat al contrari, d'aquesta manera s'aconsegueix un equilibri estable del drone.

Per tal de que tots els motors generin empenta cap al terra, necessitarem hèlixs diferents, en aquest cas necessitem 3 en sentit CW (clockwise – sentit horari) i 3 més en sentit CCW (counterclockwise – sentit antihorari)

- Hèlixs motor CW (sentit horari)



Fig. 4.12. Hèlix sentit horari escollides.

- Hèlixs motor CCW (sentit antihorari)



Fig. 4.13. Hèlix sentit antihorari escollides.

#### 4.2.4 Connexionat sistema propulsió:

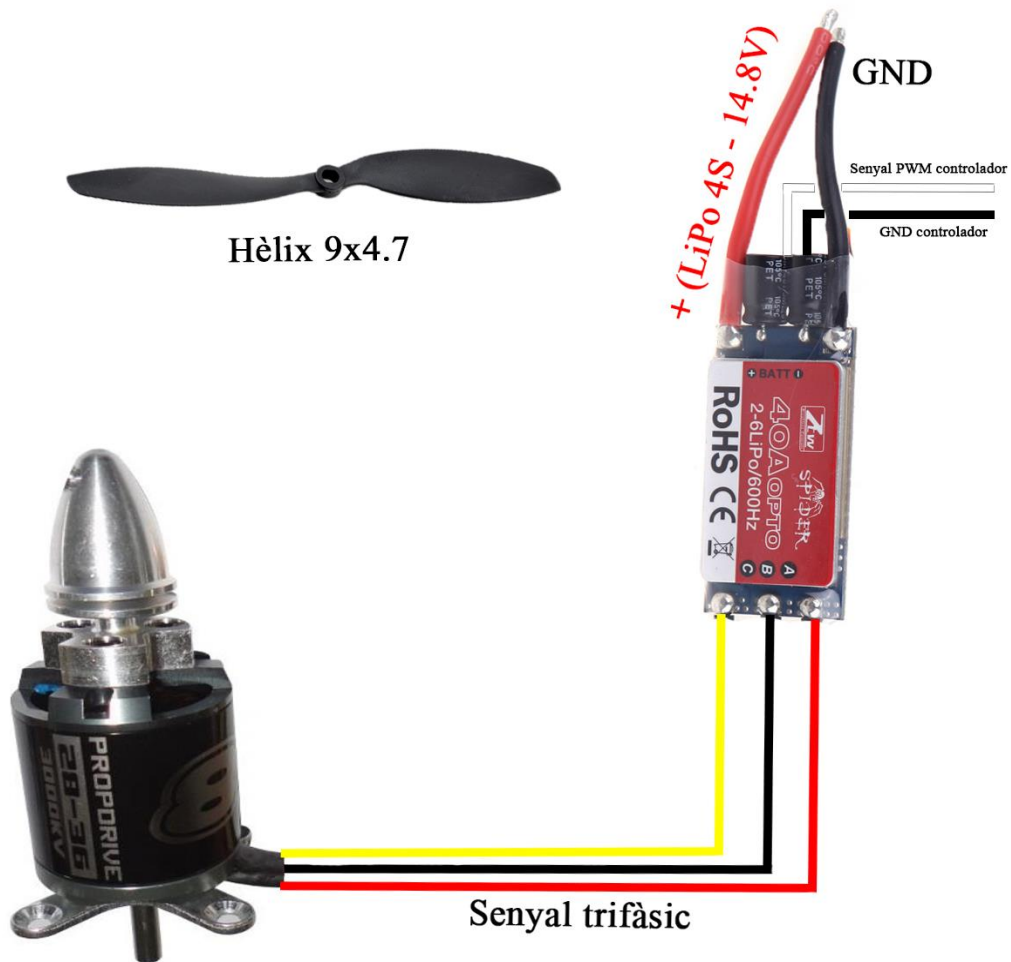


Fig. 4.14. Esquema sistema de propulsió..

Al connectar el sistema de propulsió haurem de tenir en compte de connectar correctament:

- El cable PWM de l'ESC al controlador.
- Alimentació de l'ESC a la bateria (polaritat).
- Cables del motor segons el sentit de gir que ha de tenir, si el motor ens gira en sentit contrari al que necessitem girarem dos fases entre si, els colors de l'esquema són relatius. És recomanable utilitzar connectors (veure annex, procés de muntatge).
- Ens hem d'assegurar de col·locar correctament l'hèlix segons el sentit de gir del motor (CW / CCW)

## **4.3 – Sistema d'alimentació**

### **4.3.1 – Bateria**

La bateria del nostre multicòpter és una part vital del sistema, serà l'encarregada de subministrar l'energia necessària als motors, controlador i sistema de vídeo. Hem de tenir en compte les especificacions dels motors i esc per tal de poder saber la potència necessària que la bateria ens haurà d'aportar.

El tipus més comú utilitzat en multicòpters són les LiPo (Liti i Polímer), aquestes bateries fan que el vol elèctric sigui molt viable en comparació a les naus amb combustible.

En comparació amb les bateries més utilitzades antigament, són molt bons els avantatges que ens ofereixen:

- Ens permeten una gran capacitat en un espai reduït.
- Són molt lleugeres i es poden fer de qualsevol mida i forma.
- Tenen un gran ràtio de descàrrega.

Tot i això aquest nou tipus de bateria té dos principals inconvenients, els quals amb cura no ens han de donar problemes:

- A causa de l'electròlit volàtil que contenen, fa que siguin propenses a incendiar-se o explotar en cas de rebre un cop molt fort o creuar-se.
- S'ha de controlar bé la càrrega per tal de preservar la seva vida, haurem de vigilar que els voltatges estiguin dins dels límits de seguretat.

Sabem que cada motor per generar una empenta màxima necessitarà uns 29A, al tenir 6 motors això significa 174A ja que tenim els esc connectats en paral·lel. Si a això li sumem 3A de consum màxim entre gimbal, controlador i sistema FPV, tindrem una punta de consum de **177A** quan el drone estigui treballant al **màxim**.

#### **4.3.1.1 – Classificació de les bateries**

Les bateries es classifiquen en funció del voltatge, capacitat i taxa de descàrrega

##### **4.3.1.1.1 – Voltatge (S)**

Les bateries LiPo tenen cel·les de 3.7V (4.2V quan estan carregades). Les cel·les de la bateria estan connectades en sèrie per tal d'augmentar el voltatge i mantenir la intensitat, depenent de les necessitats que tinguem, necessitarem bateries amb més o menys voltatge. En general quan més gran és el drone, més potència necessita i per tant, necessitarem una bateria més gran.

##### Connexió en sèrie

Relació de Voltatges – Cel·les:

$$1S = 1 \text{ cel·la} \times 3.7V = 3.7V \text{ (valor nominal)}$$

$$2S = 2 \text{ cel·les} \times 3.7V = 7.4V$$

$$3S = 3 \text{ cel·les} \times 3.7V = 11.1V$$

4S = 4 cel·les x 3.7V = 14.8V  
5S = 5 cel·les x 3.7V = 18.5V  
6S = 6 cel·les x 3.7V = 22.2V

Podem observar que el nombre que acompanya la S ens indicarà el nombre de cel·les connectades en sèrie, aquesta nomenclatura és utilitzada per tots els fabricants.

#### Connexió en paral·lel

Una altra nomenclatura utilitzada és la P, ens indica el nombre de bateries connectades en paral·lel. Quan connectem les cel·les en paral·lel ens servirà per augmentar la intensitat total que tindrem, en alguns casos es connecten els conjunts de cel·les per tal de tenir una bateria amb molta més càrrega. Per exemple una bateria 4S2P constarà de 2 bateries de 4 cel·les connectades en paral·lel, el que tindrem serà el doble de càrrega mantenint el voltatge de 14.8V.

A continuació es pot observar un exemple de 4S2P:

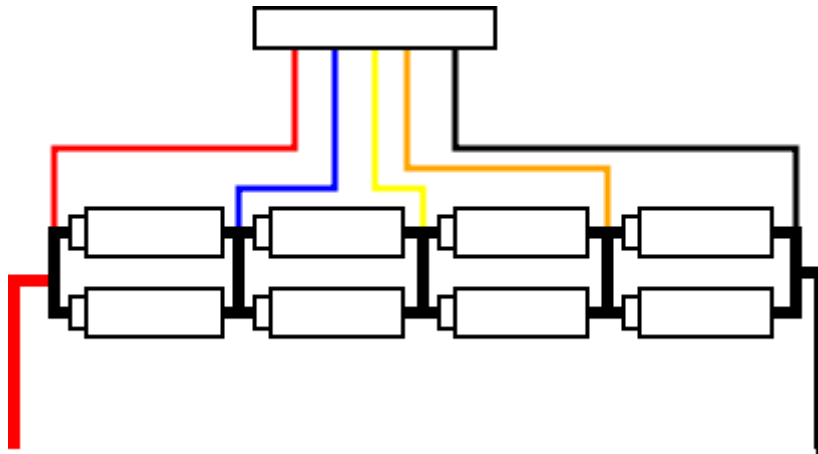


Fig. 4.15. Connexió de les celes de la bateria.

Podem veure als extrems el que seran el terminal positiu i negatiu de la bateria els quals connectarem a la PDB (placa de distribució) o bé directament als ESC.

A part totes les bateries disposen d'un connector el qual aportarà la informació del voltatge de cada cel·la, d'aquesta manera podrem saber en tot moment l'estat d'aquesta, així com també ens servirà per a que el carregador carregui uniformement la bateria i aquesta estigui ben balancejada. Entre cada cable consecutiu hi ha d'haver una caiguda de tensió de 3.7V, màxim 4.2V.

Les bateries tenen un rang de funcionament concret el qual no hem de sobrepassar per tal de conservar la bateria en bon estat, és important tenir en compte diverses consideracions de seguretat:

- Mai hem de descarregar la bateria per sota dels 3,5V/cel·la.
- Mai carregarem la bateria per sobre dels 4,2V/cel·la.
- En cas de no utilitzar la bateria en un període llarg, per tal de conservar un bon estat és recomanable posar-la en un estat d'emmagatzematge 3,8V/cel·la, cal

dir que molts carregadors inclouen aquesta funció els quals carregaran o descarregaran la nostra bateria fins deixar-la en aquest estat. Cal dir que també hi ha bosses de protecció per emmagatzemar les bateries un cop fet el procediment del voltatge.

- No barrejar al mateix sistema dos bateries de diferents voltatges i/o amperatges.
- Una bateria inflada indica un mal estat de la mateixa, aquesta és perillosa i inestable, per tant, no la utilitzarem.
- Utilitzar sempre un carregador – balancejador de LiPo connectant sempre el connector de la bateria per tenir un control de la càrrega i de l'estat d'aquesta.
- És recomanable utilitzar connectors d'alta capacitat (models XT, T, banana or, etc.)
- Controlar la càrrega de la bateria observant que no s'infla i sigui uniforme, en cas de detectar alguna anomalia desconnectar-la immediatament.
- Mai curtcircuitar les dos bornes de la bateria ja que provocaria un dany irreversible en aquesta, a part d'un elevat risc d'incendi o explosió de la mateixa.

És molt important que la bateria estigui ben balancejada, ja que sinó podria provocar un mal funcionament del sistema. Sobretot mai s'ha d'utilitzar la bateria si hi ha alguna cel·la que no carregui o es balancegi bé.

En el nostre cas, al haver d'alimentar el sistema d'imatge el qual té components que treballen a 12V hem decidit treballar a 4S (14.8V) ja que a 3S (11.1V) quedaríem curts de tensió. El voltatge el regularem a 12V per poder treballar correctament.

#### ➤ 4.3.1.1.2 – Capacitat (mAh)

La capacitat ens indica quanta energia ens aportarà la bateria (Ma) en un espai de temps (h). Els mAh de la bateria ens indicaran quants Ma aguantarà la bateria durant una hora fins descarregar-se completament. Tot i això cal tenir en compte que no descarregarem les bateries LiPo completament ja que les faríem malbé.

Haurem de seleccionar una bateria que sigui capaç d'aportar l'amperatge necessari que demanarà el nostre sistema. Si volem que duri més buscarem una bateria d'alta capacitat, però sempre haurem de tenir en compte les restriccions de pes i mida que podem aplicar al nostre drone, haurem de buscar el compromís ideal entre pes i capacitat.

#### ➤ 4.3.1.1.3 – Taxa de descàrrega o C

La taxa de descàrrega és la rapidesa amb la que una bateria pot ser descarregada sempre de forma segura. Aquesta velocitat de descàrrega depèn de la rapidesa amb la que flueixen els ions de l'ànode al càtode.

Aquesta classificació la farem a través de la nominació "C".

El número a davant de la C serà el nombre de vegades per les que multipliquem la capacitat de la bateria, és a dir, l'amperatge que podrem descarregar de cop durant la descàrrega.

Per exemple, si tenim una bateria de 2000mAh i 20C, tindrem una descàrrega màxima contínua de  $20 \times 2000 = 40000\text{Ma}$

Els fabricants ens aportaran 2 índex C, el primer és el de descàrrega constant i després trobem el "burst" que és la capacitat de descàrrega màxima durant uns instants. Això vol dir que si per exemple tenim una bateria 10C/20C burst, aquesta bateria durant uns instants (especificat pel fabricant) serà capaç d'aportar 20 cops la capacitat de la bateria.

Podem calcular la duració de la bateria a partir d'uns càlculs senzills, a continuació un breu exemple:

Disposem d'una bateria de 2000mAh i 10C de descàrrega màxima constant, considerem que tindrem un consum equivalent a la descàrrega màxima (sempre buscarem el pitjor escenari per tenir marge). En aquest cas farem els següents càlculs:

Tenim  $2000\text{mAh} \times 10 = 20000\text{Ma}$  de descàrrega

$20000\text{Ma} / 60\text{minuts} = 333.33\text{Ma} / \text{minut}$

Si dividim la capacitat de la bateria (2000mAh) entre els mA que es consumeixen per minut, veurem que la bateria ens durarà 6 minuts.

#### 4.3.1.2 – Càrrega de la bateria

Les bateries LiPo són bateries bastant delicades i per això haurem de vigilar molt a l'hora de carregar-les. Sempre carregarem les bateries amb carregadors especials per a aquest tipus i haurem de tenir en compte diferents paràmetres:

- Sempre connectarem el comprovador de les cel·les per tal de que es balancegi correctament la nostra bateria.
- Intentarem sempre carregar en el mode de balanceig, d'aquesta manera ens assegurarem que totes les cel·les tenen la mateixa càrrega de manera uniforme.
- Sempre que ens ho permeti el carregador especificarem la capacitat de la nostra bateria per tal de que aquest talli quan arribi al màxim de càrrega.
- Ens assegurarem que està especificat el voltatge de 3.7V per cel·la.
- Per acabar, podem seleccionar el voltatge i l'amperatge de càrrega. Podem carregar a 1C que seria al valor nominal de corrent de la bateria, per exemple, una bateria de 1300mAh la carregariem a 1.3A. Tot i això si volem intentar allargar la vida de la bateria és recomanable no carregar-la a més de **0.75C**, per tant, una bateria de 1300mAh la carregariem a 0.9 / 1 A.
- Assegurar que seleccionem el tipus correcte de bateria especificant el nombre correcte de "S".

En el nostre cas, vàrem comprar un carregador Imax B6 el qual és capaç de carregar LiPo de fins a 6S i a un amperatge de fins 5A. A part de LiPo també pot carregar, balancejar i descarregar altres tipus com Lilon, LiFe, NiCd i NiMH:



Fig. 4.16. Carregador de la bateria.

#### 4.3.1.3 – Com escollir la bateria?

Com ja hem dit anteriorment, hem de buscar un compromís entre pes i capacitat. Les bateries amb una taxa C més elevada sempre seran més cares, no ens podem quedar curts en descàrrega sempre és millor anar sobrants. Hem de pensar que no per això cal gastar el triple en una bateria que tingui un índex C altíssim.

Una duració adequada de vol seria d'entre 10 i 20 minuts en el nostre cas, ja que tenim un hexacòpter amb molts accessoris i de pes considerable.

Observant les especificacions dels nostres motors veiem que tindran un consum màxim d'uns 29A. Tot i això, només consumirem aquesta punta per aixecar el drone, llavors podem estimar un consum d'uns 10A tirant llarg en estat estacionari (gravació).

Fent els càlculs, a continuació hem pogut estimar la bateria que necessitarem per obtenir uns 10-15 minuts de vol:

$$10A \times 6 \text{ motors} = 60A + 3A \text{ accessoris} = 63A$$

$$\text{Bateria } 16000\text{mAh} / 63000\text{Ma} = 0,254\text{h} = 15,23 \text{ minuts vol}$$

La descàrrega de la bateria hem de calcular que serà d'un 80%, per tant tindrem uns **12,2** minuts hàbils de vol, una xifra més que acceptable. A més posar una bateria d'una capacitat més gran ens penalitzaria massa en quant a pes.

Seguint els càlculs anteriors, vam escollir la següent bateria:

- Multistar High Capacity 4S 16000mAh



Fig. 4.17. Bateria escollida.

Aquesta és una bateria 4S (14.8V) de 16000mAh i 1P, el que significa que està formada per 1 conjunt de 4 cel·les. En quant a la descàrrega té una taxa de 10C constant i 20C de pic o "burst".

A part d'aquestes característiques aquesta bateria és LiHV, aquest tipus de bateria és molt recent i es diferencia respecte a les estàndard en la càrrega màxima que admet, 4.20V les estàndard respecte 4.35V d'aquesta.

El fet de portar una bateria molt gran fa que gran part de la càrrega del drone sigui a causa d'aquesta, però degut a l'amperatge amb el que treballa el sistema és necessari utilitzar una bateria d'aquest tipus.

### Especificacions

Capacitat mínima: **16000mAh**  
Configuració: **4S1P / 15.2V**  
Descàrrega constant: **10C**  
Descàrrega de pic (10seg): **20C**  
Pes del pack (bateria): **1181g**  
Dimensions: **181 x 77 x 43mm**

També tenim una altra bateria LiPo per alimentar l'emissora ja que és molt més fiable que utilitzar piles i tindrem molta més autonomia, no ha calgut cap adaptació ja que és una bateria pensada per a emissors i porta un connector compatible. La bateria és de 3 cel·les (3S) amb una capacitat de 2620 mAh:



Fig. 4.18. Bateria de l'emissora.

### 4.3.2 – Mòdul de potència



Fig. 4.19. Mòdul de potència escollit.



Aquesta mòdul bàsicament ens serveix per alimentar el nostre controlador, rebem el voltatge de la bateria i el regulem fins aconseguir 5.3V de sortida per al Pixhawk. A través del cable de 6 fils rebrem també dades com consum de corrent i voltatge de la bateria.

POWER

Pin	Signal	Volt
1 (red)	VCC	+5V
2 (blk)	VCC	+5V
3 (blk)	CURRENT	+3.3V
4 (blk)	VOLTAGE	+3.3V
5 (blk)	GND	GND
6 (blk)	GND	GND

Fig. 4.20. Especificacions mòdul de potència.

- Max voltatge d'entrada: 28V
- Max mesura de corrent: 90A

### 4.3.3 – BEC

Per tal de poder alimentar el gimbal i el transmissor de vídeo o bé futurs accessoris que hàgim d'integrar, hem instal·lat un BEC (Battery Eliminator Circuit). El nom és degut a que aquest dispositiu ens estalvia el fet d'haver de treballar amb bateries de diferents voltatges al nostre sistema.

Rebem entre 14.8V i 16.8V (4S) i necessitem 12V de sortida.

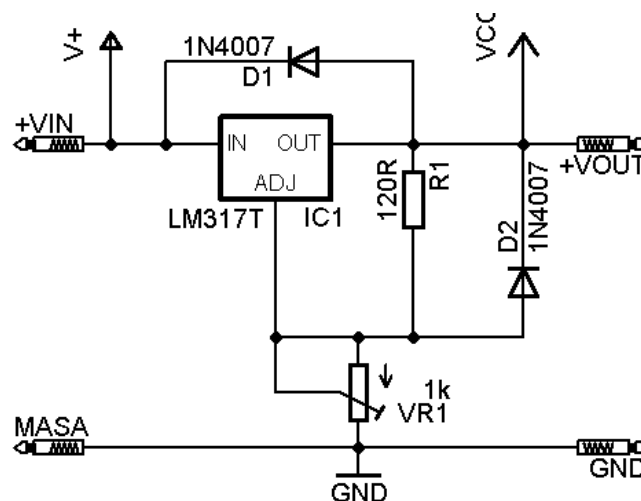


Fig. 4.21. Esquema elèctric del BEC.

El dispositiu que hem instal·lat:



Fig. 4.22.BEC escollit.

Ens permet rebre voltatges de fins a 6S molt més marge del que treballem, a més tot el cos és d'alumini i ens permetrà que el calor es dissipï de manera òptima.

## **4.4 – Sistema de control**

### **4.4.1 – Controlador**

El controlador serà el cervell del nostre multicòpter, hem d'estar segur d'escollir el més adequat a les funcionalitats que li donarem al nostre drone.

El que fa aquest component és rebre tots els senyals dels que disposi i reaccionar per si mateix (PID), els valors de PID els establirem i configurarem a través del software de cada controlador.

Depenent del controlador i dels modes de vol utilitzarem més el controlador PID o no. Per exemple, en el nostre cas si tenim el multicòpter en mode automàtic, aquest s'estabilitzarà i navegarà sol sent completament autònom. En canvi, en un drone acrobàtic en mode acro, serem nosaltres qui controlarem totalment els moviments d'aquest.

El controlador un cop processats els senyals reaccionarà generant un senyal PWM cap als ESC, controlant així els motors amb l'objectiu de realitzar els moviments necessaris o desitjats:

A la vegada el controlador també pot estar rebent dades i modificacions de les mateixes per part del pilot, també tenim opció de rebre dades a temps real ja sigui al vídeo o a dispositius externs com PC, mòbil, ...



Fig. 4.23.Controlador PIXHAWK.

#### 4.4.1.1 – Sensors

Els controladors disposen de diferents tipus de sensors segons la funció a la que estiguin destinats.

##### ➤ 4.4.1.1.1 – Sensors interns

En el nostre cas, el controlador que hem seleccionat (més endavant l'elecció) disposa de 4 tipus de sensors que ens aportaran un gran nivell de precisió:

- **ST Micro giroscòpi resolució 16-bit:** ens permet mesurar la velocitat angular dels canvis de posició.
- **ST Micro 14-bit acceleròmetre (6 eixos) / magnetòmetre:** el xip inclou els dos tipus de sensor.
  - Acceleròmetre: ens permet mesurar la inèrcia dels moviments.
  - Magnetòmetre: s'utilitza com a brúixola per saber en tot moment la direcció a la que apunta el drone.
- **MEAS baròmetre:** ens permet conèixer amb una precisió sorprenent l'altura real del vol, la seva precisió es superior a 50cm.
- **MPU6000 acceleròmetre / magnetòmetre**

##### ➤ 4.4.1.1.2 – Sensors externs

Podem instal·lar sensors addicionals als que porta el controlador per defecte per tal de millorar el funcionament del nostre drone o bé integrar-ne noves funcionalitats.

Els sensors més comuns són:

- **GPS:** es tracta d'un GPS amb magnetòmetre inclòs, en el nostre cas hem instal·lat aquest model i hem configurat el sistema per poder tenir dos magnetòmetres la qual cosa ens permetrà tenir molta més precisió. A part de rebre les coordenades i poder navegar a través de waypoints (punts de navegació) el GPS serà clau per a l'estabilitat del nostre drone, ja que la precisió d'aquest perifèric juntament al magnetòmetre farà que tinguem una estabilitat molt elevada.



Fig. 4.24. GPS escollit.

- **Sensor ultrasons:** ens permet detectar obstacles i conseqüentment el nostre multicòpter els esquivarà. Per tal de no complicar més el sistema i alleugerar-lo hem decidit no instal·lar aquest component, ja que amb el control manual no

hem de tenir problemes així com amb la navegació automàtica ja que establim el recorregut i l'alçada de vol.

#### 4.4.1.2 – Funcionament del PID

Idealment tenim 4 graus de llibertat els quals controlar (Throttle, Pitch, Yaw i Roll), aquests seran els moviments a efectuar per estabilitzar o dirigir el nostre multicòpter.

Degut a que fem un multicòpter fotogràfic, necessitarem que el nostre drone sigui el més estable possible. De forma manual podem ser capaços d'arribar a mantenir el drone recte però hi ha coses com turbulències o bé cops de vent als quals l'ull humà no serà prou ràpid com per reaccionar, aquí entra el funcionament del PID el qual serà l'encarregat de compensar i mantenir estable el nostre UAV (totalment horitzontal).

Sense tenir cap ordre sobre el controlador, aquest haurà d'intentar mantenir un angle el més pròxim a 0°.

El PID és una estructura de realimentació i control, s'encarregarà de calcular la desviació a través d'aquesta realimentació i corregir l'error per mitjà de càlculs aconseguint així el valor desitjat. El sistema rebrà dades a partir dels sensors i les compararà amb el valor objectiu (la diferència serà l'error que tenim al sistema). Consta de 3 variables (Proporcional, Integral i Derivativa):

- **Proporcional (P):** El valor més important, indica el nivell de correcció a aplicar. En quant als multicòpters aquest paràmetre s'encarregarà de l'estabilitat i control. A més valor més s'intentarà estabilitzar, però si ens passem, l'aparell oscil·larà degut a que serà massa sensible. Tenim 3 situacions possibles:
  - Si el valor de P és molt baix serà molt difícil controlar el multirrotoer perquè serà molt fàcil sobre corregir les maniobres cosa que farà impossible mantenir-lo estable.
  - Si el valor de P és correcte ens serà fàcil mantenir l'estabilitat i accelerarà correctament en aplicar o deixar gas.
  - Si el valor de P és massa alt el multirrotoer oscil·larà ràpidament o els motors emetran un so oscil·lant i agut. També guanyarà alçada fàcilment (de vegades com a salts ) i serà difícil mantenir-lo.
  
- **Integral (I):** La integral serà la velocitat amb la que es repetirà la correcció proporcional. Ens farà més progressiu l'acció d'estabilitat dictada per P. Tenim també 3 situacions:
  - Si el valor de I és molt baix el multicòpter tendirà a pujar el morro en canviar de direcció i derivarà.
  - Si el valor de I és correcte mantindrà l'angle de forma molt més precisa.
  - Si el valor de I és massa alt el multirrotoer oscil·larà lentament i tendirà a baixar el morro quan canviem de direcció. També es tornaran molt mandroses les reaccions.

- **Derivativa (D):** El valor D farà que el moviment sigui més ràpid o més suau, això farà que variï la força aplicada per P. Tenim 4 situacions:
  - Un valor de D molt baix farà el drone mandrós i el moviment pot ser similar a quan tenim la P molt baixa.
  - Un valor de D baix suavitzarà les reaccions
  - Un valor de D més elevat farà que les reaccions siguin més nervioses.
  - Un valor de D massa elevat provocarà oscil·lacions ràpides.

Esquema del controlador PID:

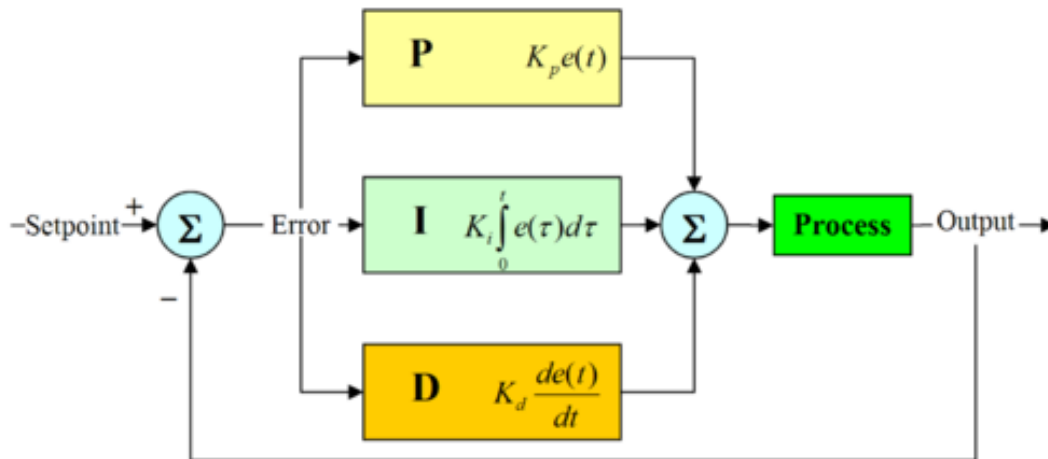


Fig. 4.25. Esquema funcionament PID.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad ()$$

Cal dir que tindrem un controlador PID per a cada moviment.

Quan ampliem o disminuïm el valor de PID estem variant les constants.

- **Kp** constant proporcional.
- **Ki** constant integral.
- **Kd** constant derivativa.
- **e(t) (punt d'ajust / valor objectiu – valor mesurat)** serà l'error calculat.

Funció de transferència equivalent en el domini de Laplace:

$$L(s) = K_p + K_i/s + K_d s, \quad ()$$

Per a controlar els moviments, necessitarem una emissora tal i com hem explicat anteriorment la qual enviarà els polsos al nostre controlador i enviarà la senyal a l'ESC.

### 4.4.1.3 – Elecció del controlador

Primerament haurem d'escollir si volem construir un multicòpter dedicat a vol fotogràfic / tranquil (slowly) o bé volem construir un dedicat a vol acrobàtic.

Les majors diferències entre aquests controladors seran la mida, sensors, processador i perifèrics que admeten.

#### ➤ 4.4.1.3.1 – Controladors acrobàtics

Aquests controladors són plaques de dimensions estandarditzades (forats) per tal de poder-los acoblar a qualsevol multicòpter acrobàtic.

Les plaques poden variar una mica de dimensions però els forats es mantenen a les mateixes (30.5 x 30.5mm).

En els 36 x 36mm que solen fer, hi tenim encabits processadors de 32 bits amb giroscopi de 3 eixos i acceleròmetre.

Dos dels controladors més utilitzats en gran part del drons acrobàtics són:

- CC3D

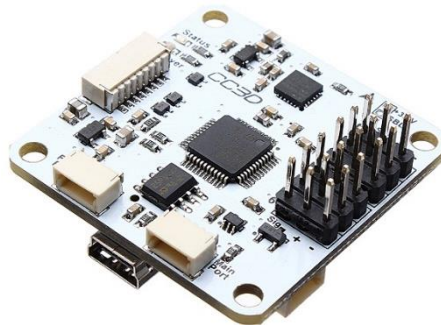


Fig. 4.26. Controlador CC3D.

- Naze32

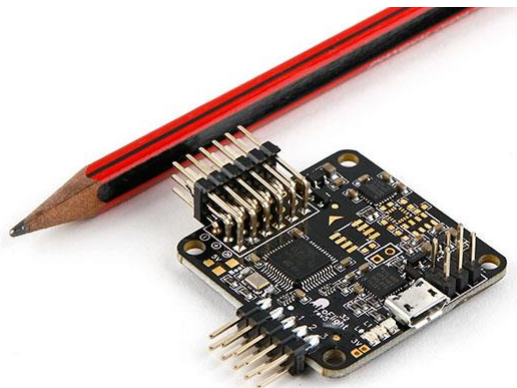


Fig. 4.27. Controlador NAZE32.

Són controladors amb el mateix processador però amb diferents sensors, el millor dels dos seria la Naze32, ja que té funcionalitats de telemetria integrades així com monitoratge de bateria, també els sensors són millors.

Especificacions del processador:

- Freqüència: 72 MHz
- Memòria Flash: 128 KB
- Memòria Ram: 20 KB

Amb el pas del temps la tecnologia evoluciona i últimament estan sortint al mercat controladors amb una gama de processadors més potents que permeten fer moviments i acrobàcies més ràpids i eficients. Es tracta dels processadors F3 i F4 que tenen les següents característiques:

- Controladors F3 chip STM32F303CC

- Freqüència: 72 MHz
- Memòria Flash: 256 KB
- Memòria Ram: 48 KB

Controladors: SpracingF3, Dodo, Tornado etc.

- Controladors F4 chip STM32F411CE

- Freqüència: 100 MHz
- Memòria Flash: 512 KB
- Memòria Ram: 128 KB

Controladors: CC3D Revo Nano

- Controladors F3 chip STM32F405RG

- Freqüència: 168 MHz
- Memòria Flash: 1024 KB
- Memòria Ram: 192 KB

Controladors: CC3D Revolution y la Sparky2.0

➤ 4.4.1.3.2 – Controladors per a vol fotogràfic

Tot i que els considerem per a vol fotogràfic aquests controladors es podrien muntar també en un multicòpter acrobàtic, tot i això per qüestions de mida i pes els evitarem.

A diferència dels acrobàtics, aquests són controladors més potents, una mica més grans amb encapsulat i amb més sensors i perifèrics possibles.

Principals raons per les quals necessiten més recursos aquests controladors:

- ✓ Tenen més sensors i per tant han de gestionar més informació
- ✓ Són capaços de gestionar molts més canals d'entrada i per tant sortides

- ✓ Poden ser totalment autònoms navegant a través de waypoints fixats al software a l'alçada especificada.
- ✓ Permeten l'estabilització de gimbal (suport per a càmeres).

El fet de tenir els avantatges anteriorment especificats, farà que el nostre drone sigui molt més estable i fiable, no obstant això, voldrà dir que tindrem una nau més pesada.

Al igual que els controladors acrobàtics hi ha dos controladors que són els més instal·lats als multicòpter fotogràfics:

- Dji Naza



Fig. 4.27. Controlador NAZA.

Controlador P&P (Plug & Play), només haurem de connectar el nostre receptor, els cables dels ESC i fer 4 configuracions molt bàsiques. És el controlador ideal per a principiants o bé per a persones que no vulguin barallar-se molt amb les configuracions. També és el controlador més estable en quant a P&P, l'ha creat DJI una de les marques amb més prestigi dins del món dels drones.

Combina 3 tipus de sensors: acceleròmetre, baròmetre i giroscopi podent incorporar opcionalment GPS extern.

En quant a especificacions només sabem que és un processador de 32bits amb una taxa d'actualització de 400Hz de freqüència, el fabricant té un sistema bastant tancat.

Suporta:

- Mode de control Autopilot
- Fail-safe habilitat
- Protecció de Voltatge baix
- S-Bus
- PPM
- Gimbal de 2 eixos





- Targeta microSD per al registre de dades
- Optimitzat per a proporcionar un control i automatització al software de navegació de vol amb un alt rendiment i capacitat.

➤ 4.4.1.3.2 – Comparativa de controladors

En comparació amb la Naza, aquest controlador és molt més permet programar a través de codi obert i fer moltes més configuracions en quant a PID, Gimbal, Modes de vol, Modes Failsafe etc. Que més endavant detallarem.

El controlador DJI sol ser una mica més car però últimament els preus s'han igualat:

- Naza v2 + GPS (169.00€)

DJI Naza V2 (GPS)



Marca: [DJI Innovations](#)  
 Código: DJINaza GPS V2  
 Disponibilidad: **Fuera de Stock**

**Haga Click Aquí: Notificarme**

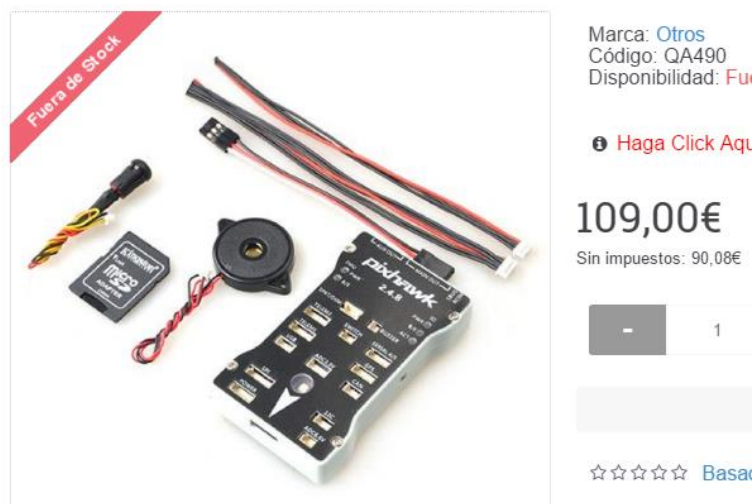
~~229,00€~~ **169,00€**  
 Sin impuestos: 139,67€

- 1 +

Fig. 4.30. Preu controlador Naza.

- Pixhawk + GPS (146.50€)

Autopiloto Pixhawk 2.4.8 PX4 FMU de 32 bits



Marca: [Otros](#)  
 Código: QA490  
 Disponibilidad: **Fu**

**Haga Click Aquí**

**109,00€**  
 Sin impuestos: 90,08€

- 1

☆☆☆☆ [Basar](#)

Fig. 4.31. Preu controlador Pixhawk.

- GPS (accessori necessari pixhawk)

Modulo Ublox NEO-7M GPS 10Hz con brujula para Pixhawk o APM



Marca: Otros  
Código: FV-NEO-7M  
Disponibilidad: En Stock

**36,50€**  
Sin impuestos: 30,17€

- 1 +

♥ Favoritos

☆☆☆☆ Basado en 0 opiniones

Fig. 4.32. Preu accessoris necessaris Pixhawk.

➤ 4.4.1.3.3 Taula comparativa de les controladores més conegudes

	APM	DJI (Naza w/ GPS)	DJI (Wookong-M Waypoint)	ZeroUAV (YS-X4 low end)	ZeroUAV (YS-X6 high end)	Mikrokopter	Hoverfly Pro w/ GPS	uThere (Ruby)
Contents	Autopilot, GPS, Power Monitor, Long-Range Telemetry	Autopilot, GPS, Power Monitor	Autopilot, GPS, Power Monitor, Telemetry, 50 waypoint package	Autopilot, GPS, Power Monitor, Telemetry, 8 waypoint package	Autopilot, GPS, Power Monitor, Long-Range Telemetry, 16 waypoint package	Autopilot, GPS, Power Monitor, Long-Range Telemetry, 100 waypoint package	Autopilot, GPS only	Autopilot, GPS
List Price	\$249	\$399	~\$3000	\$639	~\$2700	~\$2500	\$900	\$345
Full autonomy	Yes	RTL only	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Waypoints (# supported)	166	1	50	8 w/in 500m (Navigator)	16 w/in 500m (Standard)	100 w/in 250m	1	1
In-flight Route Editing	Yes	No	Yes	Guided Mode Only	Guided Mode Only	Yes	No	No
Wireless Configuration	Yes (Radio Telemetry)	No	Yes (Bluetooth)	No	No	No	No	No
Geo-Fence Support	Yes	No	No	No	No	No	No	No
Robust Simulation (HIL/SIL)	Both	No	HIL Only	No	No	SIL Only	No	No
Open Source Tools and Code	Yes	No	No	No	No	No	No	No
Open Source Communication Protocol	Yes (MAVLink)	No	No	No	No	No	No	No
Tricopter	Yes	No	No	No	No	No	No	No
Quadcopter (+ and x)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Hexacopter	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Octocopter	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Y6	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No
X8	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No
Traditional helicopters	Yes	No	Yes (Ace One)	No	No	No	No	No
Fixed-wing Aircraft	Yes	No	No	No	No	No	No	Yes
Rovers	Yes	No	No	No	No	No	No	No
Boats	Yes	No	No	No	No	No	No	No

Fig. 4.33. Taula comparativa controladors.

### ➤ 4.4.1.3.3 – La nostra elecció

Després de comparar moltes especificacions, preus, rendiment, etc. La nostra decisió final ha set escollir el controlador **Pixhawk**.

Tenim moltes raons, ja que aquest controlador s'adapta perfectament a les nostres necessitats degut a la infinitat de configuracions que ens ofereix. A més, el codi obert ens permet fer integracions futures que tenim en ment.

També la integració tant d'osd, com telemetria, gimbal, gps extern, waypoints, navegació autònoma i failsafe dedicat, fan que sigui el controlador de vol ideal per al nostre projecte.

## 4.5 – Sistema de comunicació controlador – pilot

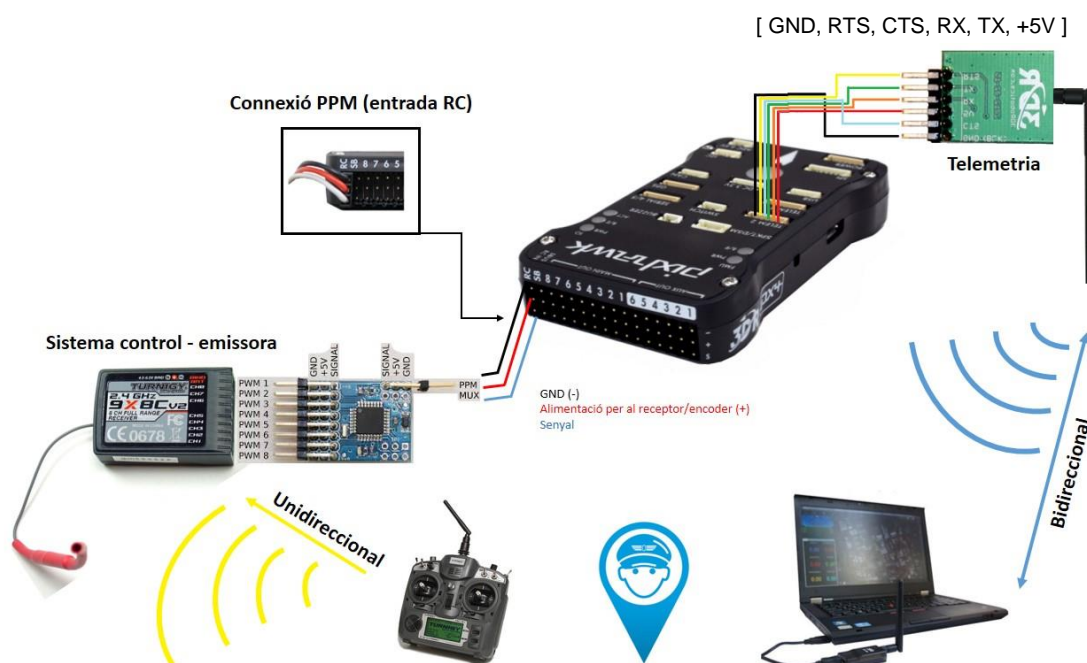


Fig. 4.34. Esquema general de comunicació.

### 4.5.1 – Emissora

L'emissora és el dispositiu a través del qual controlarem el nostre drone, per tant, hem d'escollir el que creguem que és idoni ja que és important tenir un bon enllaç entre nosaltres i aquest.

A l'hora d'escollir l'emissora ens haurem de fixar en les característiques del nostre drone, en el cas de que fos simple només necessitaríem 4 canals (essent recomanable 5). Cada canal de la nostra emissora controlarà un moviment o ordre, els principals moviments són:



- **Accelerador (Throttle):** Regularem la velocitat dels motors, per tant els podrem accelerar o desaccelerar, d'aquesta manera podrem fer que la nostra nau ascendeixi es mantingui estable o descendeixi.
- **Eix de capcineig (Pitch):** Rotació respecte eix Y (observar figura a continuació), aquest moviment ens permetrà moure el drone endavant o enrere.
- **Eix de balanceig (Roll):** Rotació respecte eix X, ens permetrà girar a esquerra o dreta.
- **Eix de guinyada (Yaw):** Rotació respecte eix Z, ens permetrà orientar el drone cap a una altra direcció.

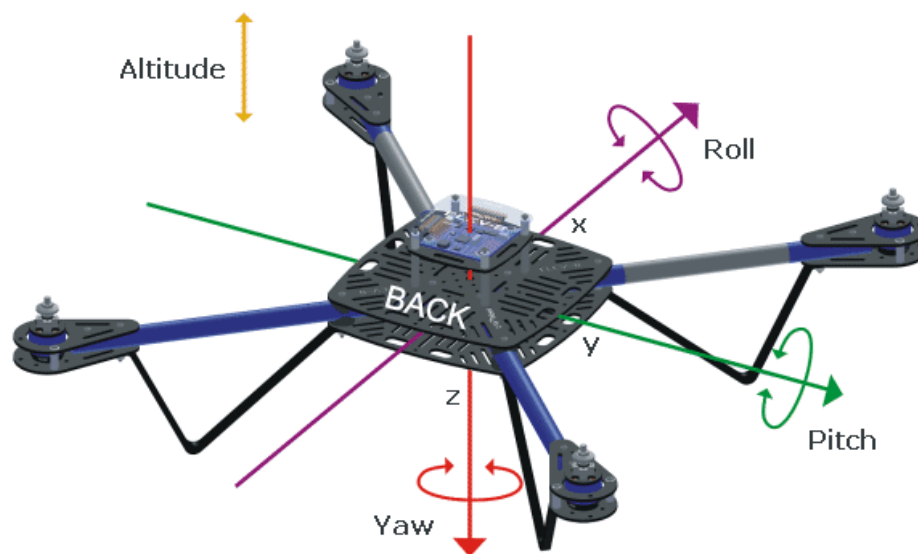


Fig. 4.35. Esquema moviments dron.

#### 4.5.1.1 – Control de moviments del multicòpter

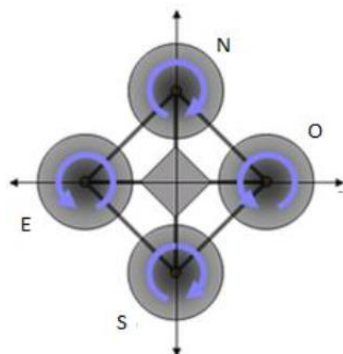


Fig. 4.36. Motors d'un dron respecte sistema de coordenades

Si situem un dron sobre un sistema de coordenades, podem determinar el comportament que hauran de tenir els motors per tal de realitzar el moviment que desitgem, tal i com es pot observar a la següent taula.

	N	S	E	O
Throttle	+	+	+	+
Pitch	-	N	+	N
Yaw	N	-	N	+
Roll	-	+	-	+

Taula 10. Resposta motors en els moviments del drone.

Hem especificat 3 tipus de moviment:

“+”: el nostre drone accelerarà el motor.

“-“: el controlador donarà l'ordre de reduir la velocitat (desacceleració).

“N”: neutre, no s'exercirà cap tipus de moviment sobre el motor.

#### 4.5.1.2 – Elecció de l'emissora segons modes i canals

A l'hora de comprar la nostra emissora és important tenir en compte que hi ha diferents modes, els estàndards que trobarem al mercat són el mode 1 i mode 2. El més utilitzat és el 2 ja que ens permet tenir l'accelerador i la guinyada (yaw) a l'esquerra i amb l'altre stick fer anar el capcineig (pitch) i balanceig (roll). És el mode més intuïtiu i fàcil d'aprendre.

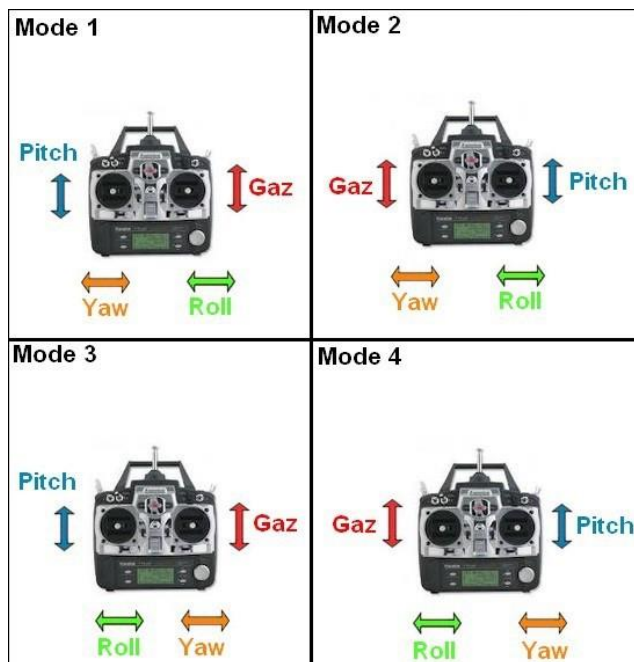


Fig. 4.37. Resposta de l'emissor.

Tot i els 4 moviments bàsics, pot ser que hàgim de canviar el mode de vol des de l'emissora o per exemple controlar un gimbal com serà el nostre cas.

Com que nosaltres haurem de controlar els dos eixos del gimbal més els modes de vol, mínim necessitarem 7 canals. Per tenir marge en cas de voler fer alguna configuració amb més canals o alguna possible ampliació, hem seleccionat una emissora de 9 canals:

- Emissora 9ch Turnigy 9X 9Ch Transmitter Mode 2



Fig. 4.38. Emissor seleccionat.

#### **Especificacions**

Nombre de canals: **8ch ppm/9ch pcm**  
Display: **128\*64LCD**  
Suporta: **Heli/Acro/Glid**  
N. Usuaris suportats: **8**  
Tipus d'encoder: **ppm/pcm**

#### **4.5.1.3 – Protocols de comunicació receptor – controlador**

##### ➤ 4.5.1.3.1 – PWM (Modulació de polsos per amplitud)

Ha sigut el més utilitzat al llarg del temps al món dels transmissors del hobby, també és el protocol que utilitzen els controladors per comunicar-se amb els ESC.

En el cas de l'emissora, el funcionament és simple, traduïm la senyal analògica dels sticks i interruptors en polsos. A més valor de senyal, més ample serà el pols, tenint en compte que polsos seran de màxim 2ms, oscil·len entre 1 i 2 ms en cas d'estar en estat actiu "ON". Els senyals s'actualitzen o es repeteixen cada 20ms, té una explicació lògica:

- Mostregem a 50Hz, per tant, 50 oscil·lacions per segon, si dividim 1000ms entre 50 oscil·lacions ens queden 20ms per oscil·lació:



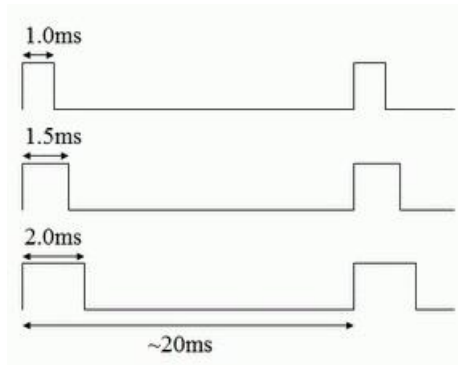


Fig. 4.39. Esquema polsos PWM.

A les interfícies gràfiques dels controladors observarem els valors en un rang de 1000 a 2000, això seran micro-segons de senyal activa. Per tant, si tenim per exemple l'stick de l'accelerador a la meitat i ens està enviant 1.5ms de senyal cada 20ms la nostra interfície ho representaria amb un valor de 1500, aquests valors seran importants a l'hora de calibrar el receptor amb el nostre drone:

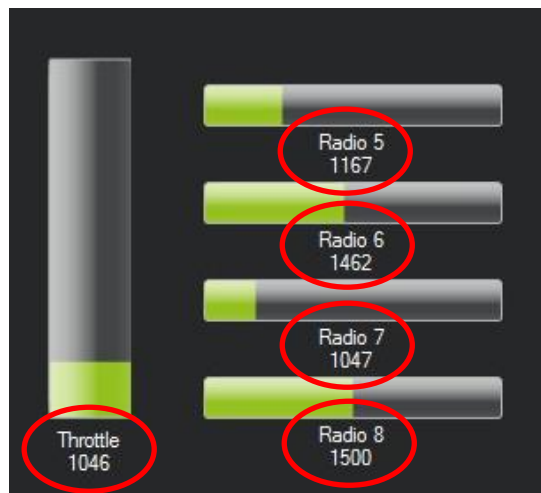


Fig. 4.40. Valors Mission Planner de l'emissor.

Amb aquest mètode si tenim 9 canals i els volem utilitzar tots, haurem de passar 1 cable per cada canal fins al controlador.

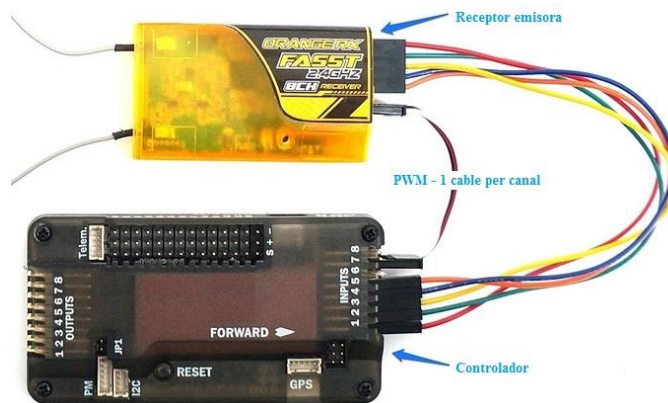


Fig. 4.41. Esquema connexió receptor-controlador.

➤ 4.5.1.3.2 – PPM (Modulació de polsos per posició)

Amb aquest mètode també anomenat TDM (multiplexat per divisió de temps) enviem els mateixos senyals modulats que en el mode PWM però successivament i seguits d'una pausa. Per exemple en una emissora de 8 canals la seqüència seria la següent: Canal1, C2, C3, C4, AUX1, AUX2, AUX3, AUX4, PAUSA i tornàriem a repetir la seqüència.

Per tant, el que fem amb aquest mode és mostrejar a la mateixa freqüència de 50Hz, hem vist que tindrem divisions de 20ms, això ens permet encabir fins a 10 canals en aquests 20ms ja que cada senyal màxim tindrà 2ms de duració. En realitat, són 9 ja que hem d'encabir una pausa. Això farà que amb només un cable puguem enviar totes les dades al controlador.

No sempre s'utilitza el mode PPM ja que no totes les emissores ho permeten, en cas de que no ho permetin existeixen encoders que s'encarreguen de passar un senyal PPM a PWM:

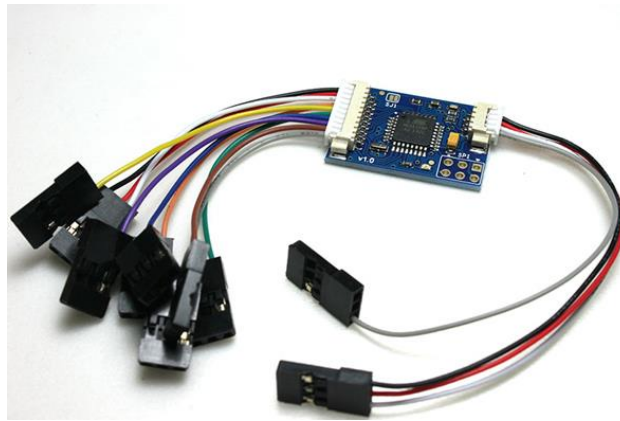


Fig. 4.42. Encoder PPM.

També hem de tenir en compte que el nostre controlador ho admeti.

A l'hora de generar els polsos PPM, ens trobem uns impulsos uniformes (mateixa amplada i alçada) però desplaçats en el temps depenent de l'amplitud del senyal analògic en el moment del mostreig.

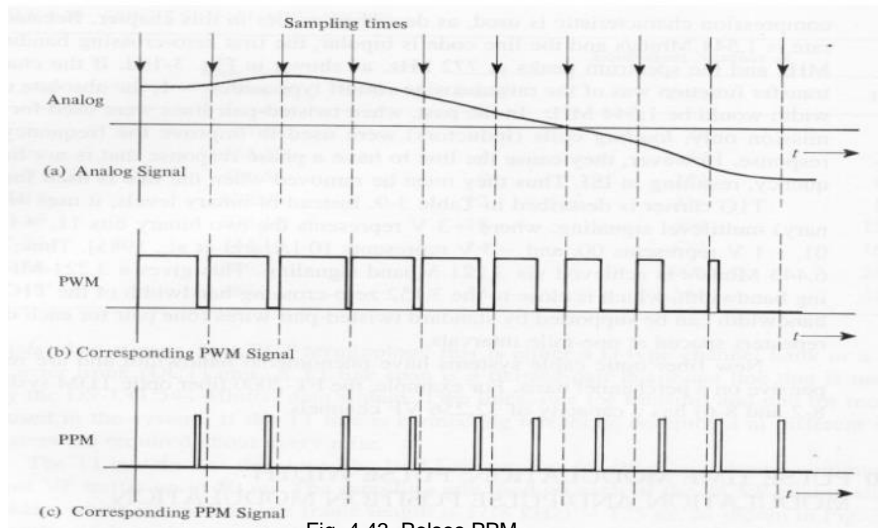


Fig. 4.43. Polsos PPM.

Podem observar que el PPM es genera quan el valor del PWM passa d' 1 a 0 (estat baix). Si ho interpolem treballant amb diversos canals:

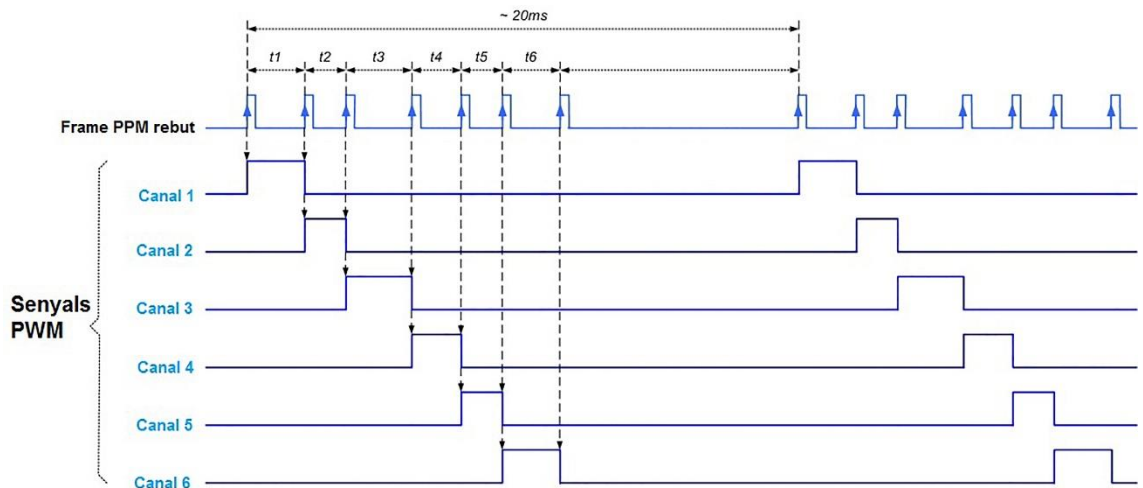


Fig. 4.44. Senyals PPM.

#### ➤ 4.5.1.3.2 – SBUS

SBUS és la última revolució en quant a protocols de comunicació, és compartit per Futaba i FrSky (dos fabricants del món del RC), suporta fins a 18 canals utilitzant només un cable de senyal.

SBUS és un senyal de comunicació UART invertida. Molts controladors de vol poden llegir l'entrada UART, però no poden acceptar-ne una invertida. Alguns controladors de vol com Pixhawk han incorporat en el convertidor de senyal dedicat per a aquest propòsit.



Fig. 4.45. Receptor S-BUS.

Tot i això els sistemes més utilitzats i assequibles són el PWM i PPM.

## **4.5.2 – Telemetria**

La telemetria que ens ofereixen els controladors pot ser utilitzada amb dos objectius:

### **4.5.2.1 – Rebre dades del controlador**

Podem rebre dades del controlador per mostrar-les en un OSD, per exemple, en aquest cas la comunicació serà unidireccional.

### **4.5.2.2 – Comunicar amb el controlador**

Es tracta de comunicació bidireccional amb el controlador, rebrem dades però també li enviarem. Això és molt útil per poder fer configuracions sense fils i inclús rebre dades i/o enviar-ne al controlador per tal de modificar alguna cosa en ple vol.

Aquest tipus de comunicació en serà molt útil en el nostre cas, ja que podrem rebre a través de radiofreqüència les dades a temps real que ens proporcionarà el controlador a través del software. Per a que això sigui possible tenim un emissor muntat al drone i connectat al port de telemetria i després a través de radiofreqüència (433MHz) rebem les dades gràcies a un receptor connectat a través d'USB al nostre PC.

El fet de poder comunicar en tot moment el software amb el multicòpter ens permetrà també poder fer les missions / navegació automàtica (waypoints) i controlar-ho en tot moment, a més de poder modificar la trajectòria o paràmetres com l'altura.

El sistema de telemetria que utilitzem és un kit de 3DR a 433MHz, el Pixhawk té 2 ports de telemetria pel que podrem utilitzar un per a l'OSD i l'altre per a la comunicació inalàmbrica.



Fig. 4.46. Sistema de telemetria 433MHz.

## 4.6 – Sistema d'imatge

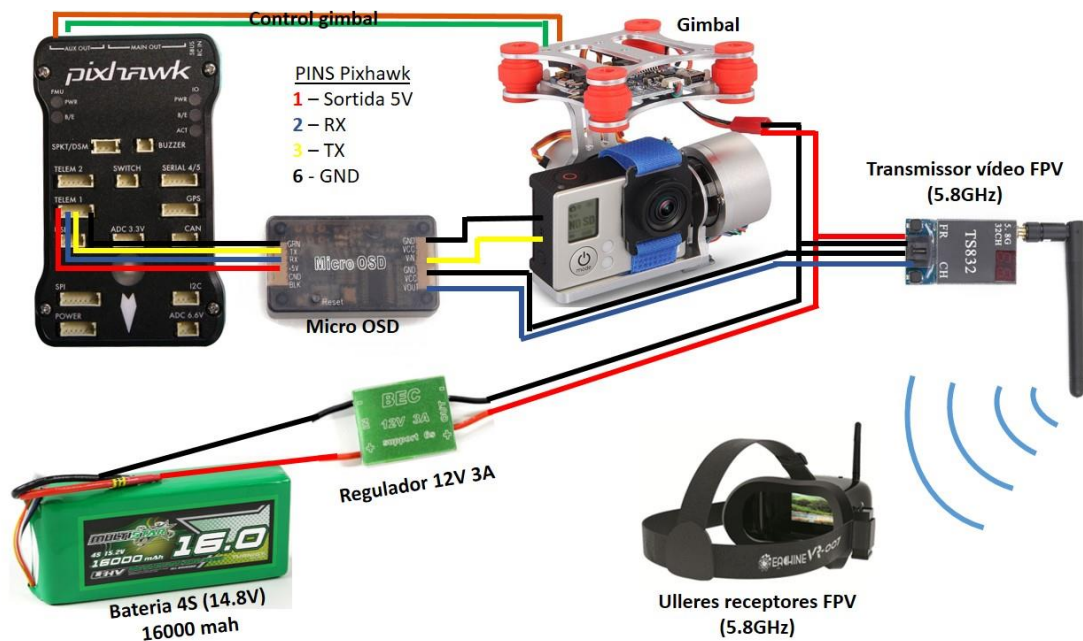


Fig. 4.47. Esquema sistema d'imatge.

### 4.6.1 FPV (First Person View – Visió en primera persona)

L'FPV és un mètode utilitzat per controlar un vehicle radio control des del punt de vista del pilot. És el mètode més comú que s'utilitza per pilotar un avió controlat per ràdio o un altre tipus de vehicle aeri no tripulat (UAV). El vehicle és conduït o dirigit per control remot des d'una perspectiva en primera persona a través d'una càmera a bord, aquest vídeo es transmet a través d'un emissor de vídeo sense cables (5.8 GHz) i es rep en unes ulleres FPV o bé en un monitor de vídeo. Cal dir que el més utilitzat són les ulleres ja que ofereixen una sensació més realista.

#### 4.6.1.1 – Càmera FPV



Fig. 4.48. Càmera Sony 600TVL.

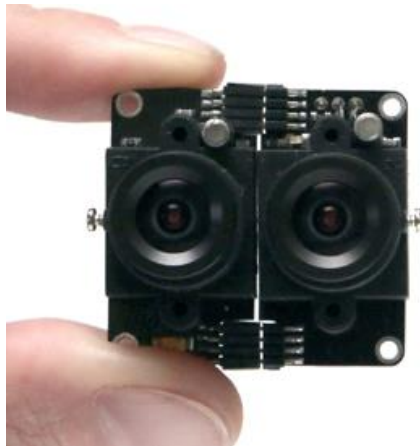


Fig. 4.49. Càmera 3D dual 470TVL.

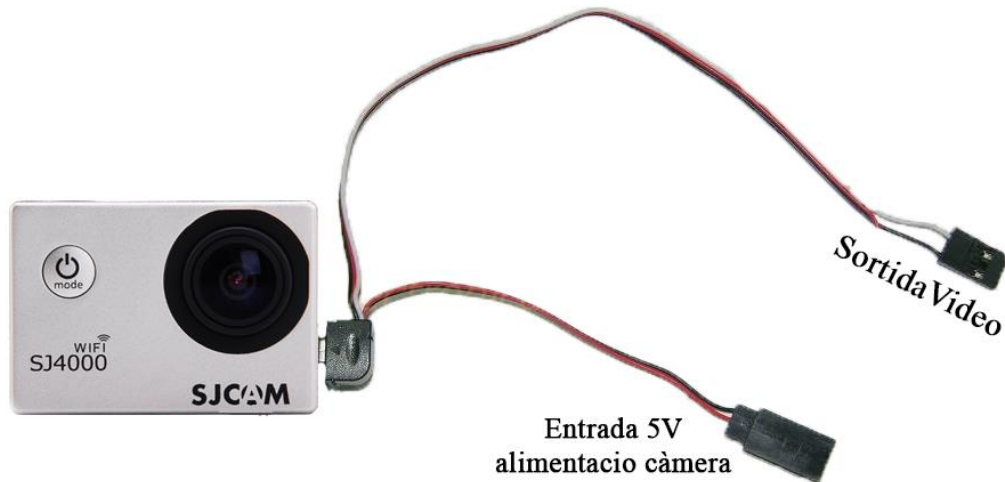


Fig. 4.50. Càmera SJCAM amb cable adaptador per FPV.

A l'hora d'adquirir una càmera per a FPV hem de tenir en compte la utilitat que necessitem així com la resolució que voldrem i el voltatge amb el que treballarem.

Podem fer servir càmeres fabricades únicament per a FPV o bé podem adaptar qualsevol càmera al nostre sistema de FPV mitjançant cables i/o conversos. En el nostre cas farem servir una SJCAM (similar a GoPro) la qual ens subministrarà el vídeo a través d'un cable connectat al port USB.

En el cas de voler tenir una visió més estereoscòpica o 3D existeixen sistemes de càmeres duals.

Cal dir que nosaltres hem fabricat un multicòpter pensat per a gravació i per tant el fet de poder tenir un petit retard (mil·lisegons) no ens influirà ja que no farem moviments ràpids.

En cas de volar amb un drone acrobàtic ens interessarà muntar una càmera FPV la qual no ens donarà pràcticament retard apreciable a plena vista.

El fet de poder tenir un retard minso amb una càmera com podria ser una GoPro, SJCAM, ... és degut a que són càmeres digitals i per tant tenen un tractament d'imatge previ. En canvi, les càmeres FPV donen una senyal de sortida totalment analògica, la qual no haurem de convertir.



➤ 4.6.1.1.1 – Resolució Càmeres

Al treballar amb vídeo analògic, no podem parlar de píxels sinó que parlarem de TVL (línies de televisió). Aquest terme defineix el nombre de línies verticals i horitzontals que trobem en un lapse horitzontal igual a l'altura de la imatge.

➤ 4.6.1.1.2 – Voltatge

En quant a voltatge, hi ha càmeres que ens permeten treballar a 5V o bé a 12V. En cas de tenir una càmera digital, no ens caldrà alimentar-la. Si s'utilitza una càmera similar a la nostra (digital), si volem estalviar pes podem prescindir de la bateria i alimentar-la a través dels 5V que ens pot aportar el regulador del drone.

### 4.6.1.2 – Gimbal

Les configuracions més sofisticades inclouen un suport per a la càmera anomenat Gimbal, el qual està estabilitzat i és inclinable (a través de motors brushless), està controlat gràcies a la informació que rep d'un sensor de giroscopi.

Bàsicament tenim 2 tipus de gimbal, depenent dels eixos que vulguem moure, en tenim de 2 eixos o bé de 3. Hem de tenir en compte que cada eix serà un canal d'emissora i per tant, com a mínim haurem de tenir els suficients per controlar el multicòpter més els eixos del gimbal.

En quant als moviments que tenim:

- 2 eixos (el nostre cas): capcineig (pitch) i balanceig (roll)

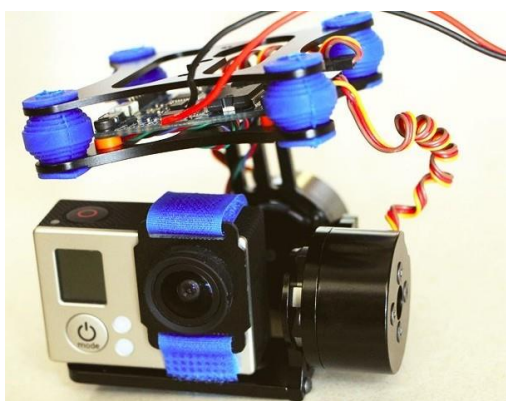


Fig. 4.51. Gimbal 2 eixos.

- 3 eixos: capcineig (pitch), balanceig (roll) i guinyada (yaw)



Fig. 4.52. Gimbal 3 eixos.



En el nostre cas hem instal·lat un de dos eixos ja que amb el moviment de capcineig (pitch) i balanceig (roll) en tenim bastant, amb el moviment de guinyada al tenir el tren d'aterratge veuríem les potes i ens molestaria. Cal dir que hi ha l'opció d'instal·lar un tren d'aterratge retràctil però això significa més canals i més pes.

#### **4.6.1.3 – Transmissor FPV**

Per poder rebre el vídeo analògic desde la nostra nau, necessitarem un aparell que sigui capaç de transmetre'l de forma inalàmbrica. Depèn de les nostres necessitats tenim diferents transmissors que podem classificar segons la potència i canals amb els que poden treballar.

Per classificar la potència els fabricants ens especifiquen Mw, les potències més comuns són 25Mw, 200Mw, 250Mw, 400Mw i 600Mw. A més potència, més alcanç tindrem, també cal dir que és recomanable utilitzar antenes polaritzades ja que aquestes ens proporcionaran una millor cobertura i evitaran més els problemes d'interferències.

En el cas dels multicòpters acrobàtics amb un transmissor de 200Mw en tenim prou ja que no volem a distàncies molt llunyanes. En canvi, amb el nostre drone podrem arribar a molta distància, per tant, recomanable un de 600Mw.

En quant a canals, a més canals evitarem possibles interferències ja que podrem treballar amb més freqüències. La freqüència estàndard és 5.8GHz però dins d'aquests tindrem petites variacions, aquesta freqüència està dins de les bandes ISM permeses.

#### Banda ISM

Les bandes ISM (Industrial Scientific Medical) són bandes de radiofreqüència electromagnètica reservades internacionalment per a ús no comercial en àrees de treball industrials, científiques i mèdiques. Aquestes bandes poden utilitzar-se sense necessitat de llicència sempre que es respectin uns determinats límits de potència.

La freqüència a la que treballem (5.8 GHz) va ser introduïda al 2003, és la més recent.

Tenim un límit de 25Mw d'emissió pel que a més potència és necessària una llicència de radioaficionat, tot i això és una potència molt baixa a aquestes freqüències i no tindríem gaire abast.

Com es pot veure a la taula que tenim a continuació juguem amb freqüències i canals a l'hora de configurar el nostre transmissor, en el cas d'un transmissor de 40ch tenim 8 canals a 5 bandes de freqüència diferents:

FR \ CH		CH							
		CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
FR	FR1 or (A)	5865M	5845M	5825M	5805M	5785M	5765M	5745M	5725M
	FR2 or (B)	5733M	5752M	5771M	5790M	5809M	5828M	5847M	5866M
	FR3 or (E)	5705M	5685M	5665M	5645M	5885M	5905M	5925M	5945M
	FR4 or (F)	5740M	5760M	5780M	5800M	5820M	5840M	5860M	5880M
	FR5 or (R)	5658M	5695M	5732M	5769M	5806M	5843M	5880M	5917M

Taula 11. Freqüència transmissor FPV.

La freqüència 5 o "R" és anomenada raceband, aquesta banda de freqüència té més separació entre canals que les altres bandes, aquests salts són de 37MHz. Això ens permet tenir en aquesta banda 8 pilots sense trepitjar-se per molt que tinguin transmissors diferents. A continuació una imatge del transmissor que utilitzem, es tracta d'un Boscam TS832 de 32 canals i 600Mw ja que ens interessa tenir el màxim d'abast possible (podem arribar fins a 2Km de transmissió en camp obert).



Fig. 4.53. Transmissor 32 canals.

Les antenes que se solen muntar són antenes polaritzades circularment (depenen del vector de polarització), els fabricants venen antenes polaritzades a esquerres i a dretes, això a la pràctica ens permet tenir 16 pilots en una banda de freqüència sempre i quan 8 tinguin antenes a esquerres i 8 a dretes.



Fig. 4.54. Antenes polaritzades.

Últimament han sortit al mercat càmeres amb transmissor integrat, tot i això són transmissors de baixa potència (25Mw) i en el nostre cas no ens serviren:



Fig. 4.55. Càmera FPV amb transmissor integrat.

#### 4.6.1.4 – Receptor FPV

El receptor serà l'encarregat de rebre la senyal de vídeo i mostrar-la al pilot, tenim bàsicament dos tipus de receptors: monitors o ulleres fpv. Els dos tipus de dispositiu solen portar receptor de 5.8GHz el qual és capaç d'escanejar les freqüències, al igual que el transmissor n'hi ha amb diferent nombre de canals. Trobem dos tipus de receptor, n'hi ha que escanegen totes les bandes de freqüència automàticament fins detectar el vídeo i n'hi ha que s'ha d'especificar la banda i canal.

En quant a ulleres o monitor, els dos sistemes es basen en una pantalla, l'únic que variarà serà el format. Depèn de l'aplicació ens interessarà tenir un monitor o bé unes ulleres. La majoria de pilots prefereixen ulleres ja que és major la sensació d'estar a la nau.



Fig. 4.56. Monitor FPV.

En el nostre cas hem seleccionat unes ulleres FPV de la marca eachine de 40 canals, les quals porten un receptor de 40 canals (reben raceband) i amb bateria inclosa:



Fig. 4.57. Ulleres FPV.

Com a curiositat, trobem fins i tot rellotges que reben vídeo a un preu molt assequible (entre 30 i 40€):



Fig. 4.58. Rellotge FPV.

#### 4.6.1.5 – OSD

A més de rebre el vídeo trobem uns dispositius anomenats OSD els quals són capaços de mostrar informació a sobre del vídeo, d'aquesta manera podrem veure informació del nostre multicòpter a temps real. Trobem osd que ens mostren simplement el nivell de bateria i d'altres que són més complets i ens permeten configurar-los i mostrar informació proporcionada per la telemetria del controlador: Alçada, velocitat, temps de vol, inclinació, temperatura, rpm dels motors, etc.

És molt important el fet de poder monitoritzar el nivell de bateria ja que podrem anar controlant l'autonomia d'aquesta i així aprofitar al màxim el vol.

El que fa bàsicament aquest dispositiu és agafar la senyal de vídeo de la càmera i sobreposar la seva informació, traient el vídeo cap al transmissor fpv.

En el nostre cas utilitzem un dispositiu anomenat Mini OSD el qual agafa la informació de la telemetria del pixhawk i la mostra en pantalla:



Fig. 4.59.OSD seleccionat.

Exemple OSD vist des d'un monitor o ulleres:



Fig. 4.60. Exemple visió OSD.

## 4.7. Pes total part electrònica

Material	Pes
Accessoris motors	13,8g
Hèlix	75g
GPS	38g
Pixhawk +suport	73g
Telemetry	33,2g
Motors	85g·6
ESC	33g·6
Gimbal	218g
Transmissor FPV	96g
Bateria	1181g
Mòdul potencia	35g
Bec	11,7g
Encoder	7g
Receptor Emissora	18g
OSD	18g
<b>TOTAL</b>	<b>2511,9g</b>

Taula 12. Pes total del sistema electrònic.

## 4.8. Comprovació del sistema.

Per comprovar que els nostres càlculs i el nostre sistema serà viable, hem utilitzat una calculadora per a radiocontrol la qual inclou moltes peces de les que podem trobar al mercat amb les seves especificacions tècniques. Introduïrem totes les característiques del nostre multicòpter i aquest ens proporcionarà tots els resultats del sistema.

### Bateria

<b>Bateria</b>	
Carga:	10.66 C
Voltaje:	12.07 V
Tensión nominal:	14.80 V
Energía:	236.8 Wh
Capacidad total:	16000 mAh
Capacidad usada:	13600 mAh
Tiempo min de vuelo:	4.8 min
tiempo medio de vuelo:	12.6 min
Tiempo de vuelo estacionario:	15.1 min
Peso:	1360 g
	48 oz

Fig. 4.61. Resultats bateria.

Si comparem amb els resultats dels nostres càlculs observarem que hi pot haver una petita diferència però que són correctes, coincidim en un temps mitjà de 12min de vol i en vol estacionari de 15min.

### Motors

<b>Motor a eficiencia óptima</b>		<b>Motor al Máximo</b>	
Corriente:	18.61 A	Corriente:	27.91 A
Voltaje:	12.90 V	Voltaje:	11.90 V
Revoluciones*:	14270 rpm	Revoluciones*:	12467 rpm
Potencia eléctrica:	240.1 W	Potencia eléctrica:	332.3 W
Potencia mecánica:	203.7 W	Potencia mecánica:	276.0 W
Eficiencia:	84.8 %	Potencia-Peso:	604.2 W/kg
			274.1 W/lb
		Eficiencia:	83.1 %
		Temperatura ext.:	45 °C
			113 °F

Fig. 4.62. Resultats motors.

Segons veiem als resultats dels motors tot i treballar al màxim no arribarem al pic de 36A que tenim de límit. Veiem que la potència i l'amperatge que consumirem no és molt elevat en comparació al límit que podria treballar el nostre multicòpter, això ens

proporcionarà una autonomia molt bona (15min) , comptant que la bateria no està plena del tot i no la descarreguem al màxim.

L'eficiència dels motors integrats al nostre sistema és superior al 80%, per tant, un bon rendiment.

La temperatura exterior es refereix a la de la carcassa, per tant, trobem que no és elevada.

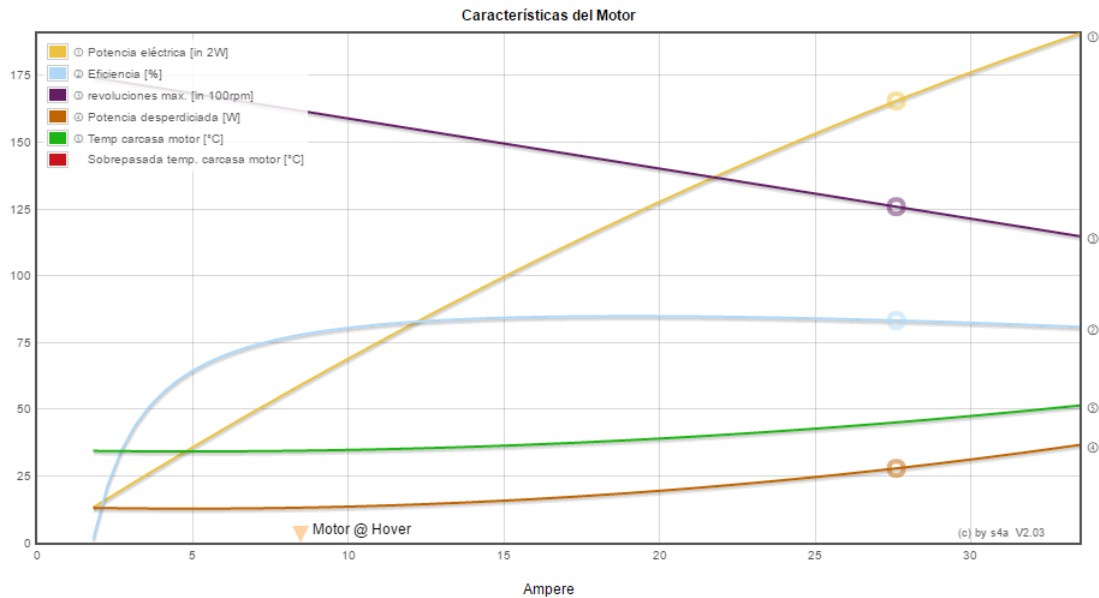


Fig. 4.63. Característiques-Amperatge.

En aquesta gràfica podem observar les característiques abans reflectides en funció de l'amperatge al que treballem.

L'eficiència dels nostres motors augmenta dràsticament a partir del 2A aconseguint l'eficiència màxima a partir dels 10A.

La potència com és lògic augmentarà a més amperatge i la temperatura també però la variació no és elevada, a potència màxima 50°C.



# Capítol 5

## Programació de la placa controladora.

### 5.1. Programa per configurar el multicòpter:

Per a la configuració dels paràmetres del multicòpter s'ha utilitzat el software Mission planner. Aquest software és una estació de control per a diferents tipus de vehicles controlats remotament només compatible amb Windows. Es pot utilitzar com una utilitat de configuració o com un suplement per al control dinàmic per al vehicle autònom. Les seves funcions principals són les següents:

- Carregar el firmware ( APM , PX4 ... ) que controla el seu vehicle.
- Establir, configurar i posar a punt el seu vehicle per a un rendiment òptim.
- Guardar i carregar missions autònomes amb pilot automàtic amb de la manera tant senzilla com clicar sobre un mapa de Google o altres.
- Descarregar i analitzar els registres de les missions creades pel pilot automàtic.
- Interfície amb un simulador de vol per crear un simulador de vehicles aeris no tripulats amb hardware complet.
- Amb el maquinari apropiat de telemetria es pot :
  - o Supervisar l'estat del seu vehicle mentre està en funcionament.
  - o Registres de telemetria que contenen molta més informació dels registres dels pilots automàtics de bord.
  - o Veure i analitzar els registres de telemetria .
  - o Utilitzar FPV ( vista en primera persona )

### 5.2. Configuració bàsica:

Al obrir el programa es troba aquesta pantalla inicial. En aquesta pantalla veiem a dalt a l'esquerra de la figura 5.1 l'estat en que estaria el nostre equip. La pantalla superior a l'esquerra en aquest cas, ens indica que està desarmat, i sense GPS trobat ja que el multicòpter no esta connectat.



Fig. 5.1. Pantalla inicial Mission Planner.



A baix a l'esquerra ens mostra diferents valors durant el vol, com l'altitud, la velocitat, la inclinació etc...i finalment a la part de la dreta de la figura es veu un mapa, on si estiguéssim connectats al GPS es mostraria la localització exacte del vehicle.

El primer pas per a la configuració de la placa controladora és escollir el tipus de morfologia amb la qual treballarà la placa controladora. En aquest cas és configuració hexacòpter. Un cop fet això, el mateix programa descarrega el firmware que ha de ser escrit a la memòria de la placa controladora. Per a fer tots els passos següents, s'ha de tenir en compte que la placa controladora ha de tenir comunicació amb l'ordinador.

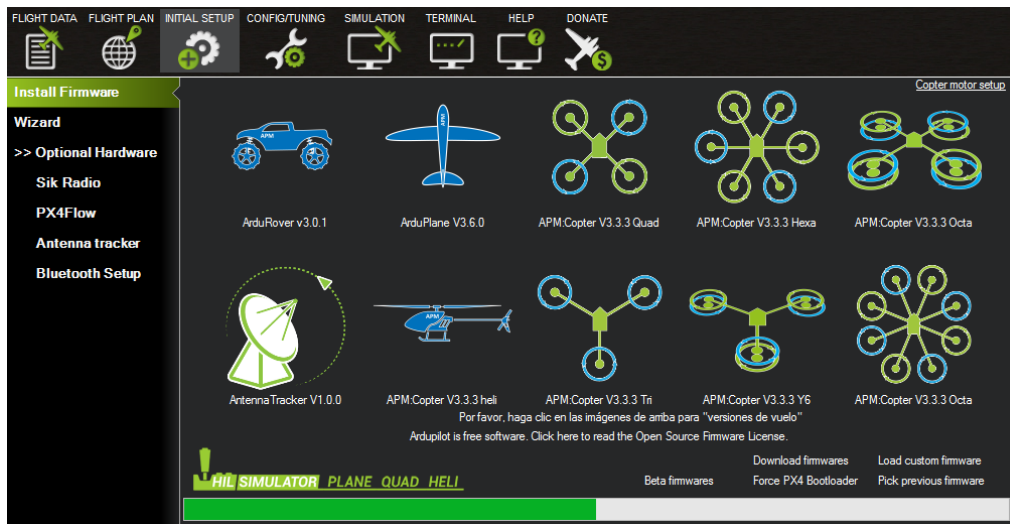


Fig. 5.2. Configuracions inicials.

Un cop realitzat aquest pas, es mostrarà una altre pestanya a l'esquerra de la imatge "mandatory hardware" com es mostra en la figura 5.3 on en aquesta ens deixarà configurar molts dels valors que s'han de configurar. El primer que s'ha de fer és escollir la orientació de la placa controladora sobre l'estructura, ja que la fletxa indicadora de la direcció de la placa controladora pot apuntar a la mateixa direcció que un braç, o en la direcció entre dos braços. Aquestes són les anomenades morfologia PLUS o morfologia X respectivament.

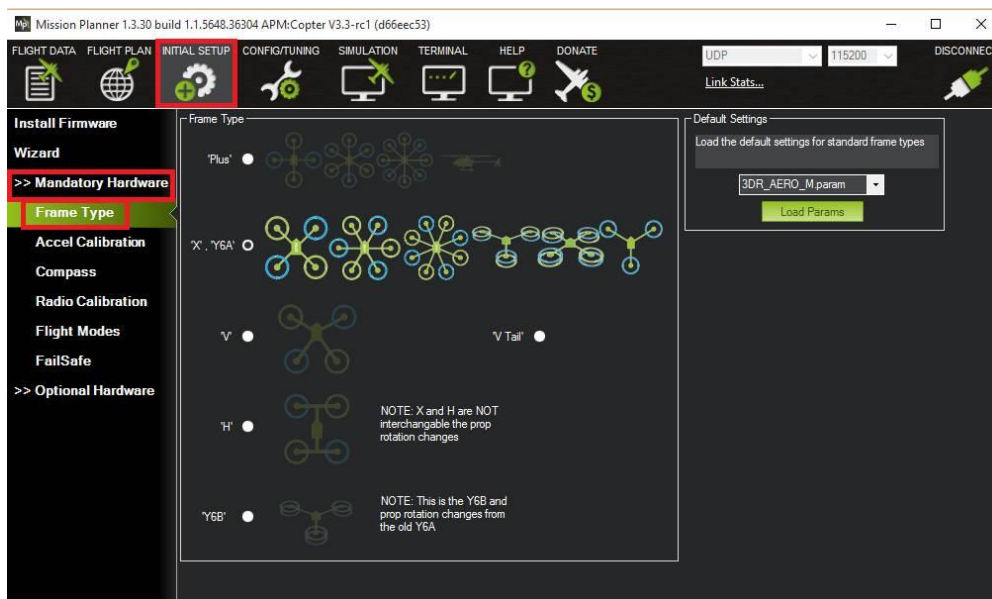


Fig. 5.3. Pantalla configuració morfologia.

### 5.3. Calibratge acceleròmetre:

El calibratge de l'acceleròmetre és un dels passos més importants per el funcionament del multicòpter. L'acceleròmetre mesura els moviments del multicòpter en els 3 eixos utilitzant l'acceleració de cada un d'aquest eixos en un moment determinat.

Per el calibratge de l'acceleròmetre, el programa te un conjunt de passos a seguir per un correcta resultat. Com s'observa a la figura següent hi ha dos botons, el primer serveix per a calibrar els tres eixos principals de l'acceleròmetre, i el segon un cop acabat el calibratge dels 3 eixos principals, serveix per anivellar l'horitzó de la pantalla vista inicialment en la figura 5.4.

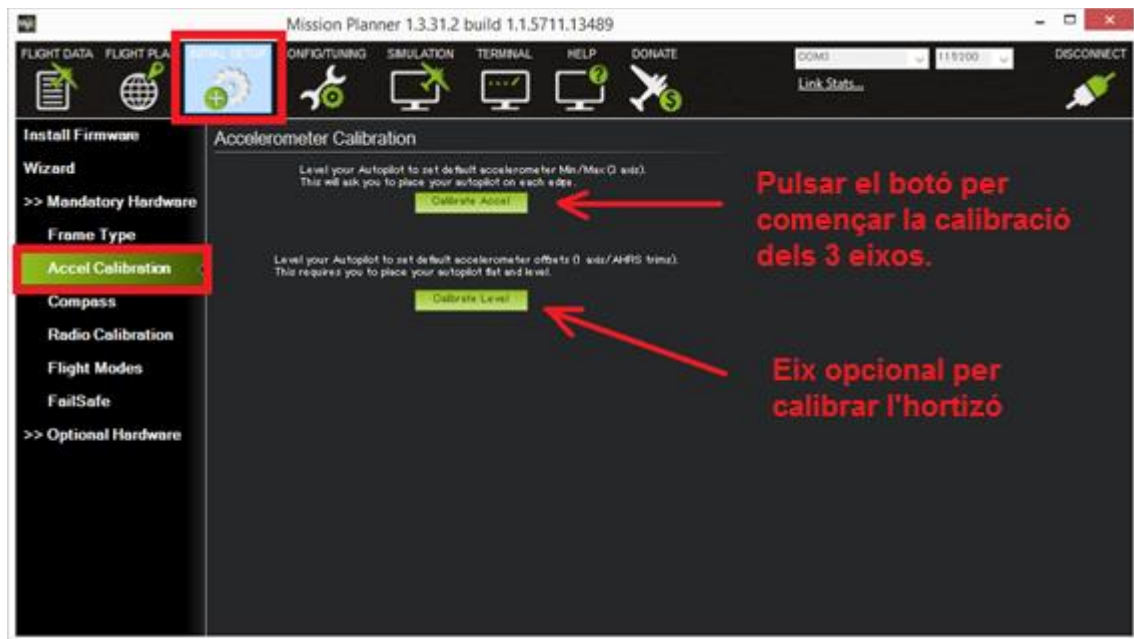


Fig. 5.4. Pantalla calibratge acceleròmetre.

Un cop polsat el botó per calibrar els 3 eixos principals, el programa farà seguir a l'usuari un conjunt de passos a seguir. Aquests passos són moure el multicòpter en els diferents eixos, i pulsar qualsevol boto del teclat perquè el programa agafi els valors de l'acceleròmetre en aquell eix. Els moviments són els que es poden veure en la figura 5.5.



Fig. 5.5. Orientacions calibratge acceleròmetre.

Un cop realitzat aquests passos, el programa ja avisa a l'usuari que el calibratge s'ha realitzat. Si aquesta no s'ha realitzat correctament el programa avisa a l'usuari.

## 5.4. Calibratge de la brúixola.

La brúixola de la placa controladora, serveix per tenir controlat en tot moment la direcció en que el multicòpter apunta. Això és molt important ja que les ordres de moviment enviades per l'emissor van referides respecte la direcció en la qual apunta la placa controladora. Si no es conegués en tot moment la direcció respecte el món de la placa controladora, seria molt complicat de fer volar aquest tipus de vehicles. En el multicòpter construït tenim una brúixola interna i una externa a la placa controladora, d'aquesta manera entre les dos brúixoles ben calibrades.

S'observa en la figura 5.6 les diferents opcions de configuració.



Fig. 5.6. Pantalla calibratge brúixola.

En les configuracions generals de la brúixola, en 1 s'activen les brúixoles i se'n tria una com a principal. Un cop fet això, en 2 es tria l'opció per obtenir la desviació i els offsets d'aquestes automàticament.

Observem en 3 i en 4, que en les brúixoles 1 i 2 es pot escollir si són la muntades exteriorment o no, i si s'utilitzen o no. També s'observa que en la brúixola 1 es poden triar més opcions que no s'han cregut essencials d'explicar, ja que no afecten massa al resultat de calibratge.

Finalment per iniciar el calibratge s'ha de pulsar el botó Live Calibration que veiem amb el numero 5 en la figura 5.6. Automàticament s'obre la pestanya que podem veure en la figura 5.7, en la qual s'observa en temps real el moviment de les dos brúixoles diferents del nostre sistema.

El calibratge es completarà automàticament quan el programa hagi adquirit dades per a totes les posicions. En aquest punt, una altra finestra saltarà avisant que el calibratge s'ha acabat i s'han calculat els offsets. Aquests es mostren a la pantalla principal sota de cada compàs associat. Si en el resultat de calibratge surten uns

offsets que tinguin un valor més gran de 600, s'haurà de repetir el calibratge, o fins i tot realitzar canvis en el multicòpter perquè això no passi.

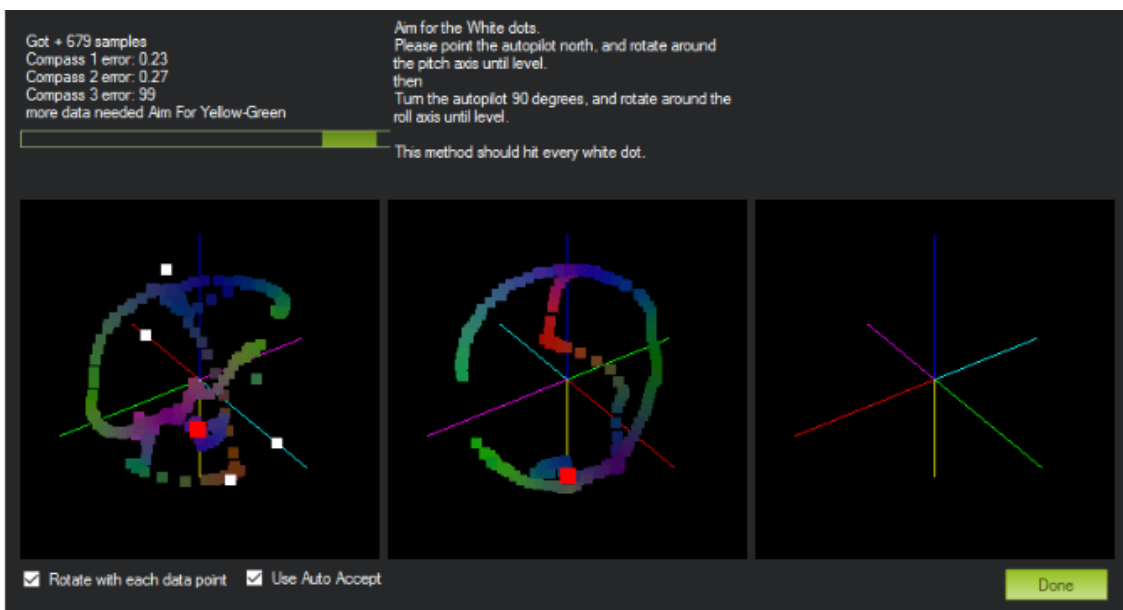


Fig. 5.7. Pantalla del procés de calibratge de les brúixoles.

El fet de triar com a brúixola 1 o brúixola 2 la nostra brúixola externa no es transcendental. Tot i així s'ha de comentar que si al començar el calibratge una de les dos brúixoles no és detectada, s'haurà de canviar els paràmetres de configuració que es poden trobar a la pestanya "llista completa de paràmetres" i activar el reconeixement automàtic d'aquests.

## **5.5. Calibratge ESC.**

La majoria de ESC han de ser calibrats per que pugui reconèixer el nivell màxim i mínim de PWM que envia el controlador de vol. Per tant és important un bon calibratge perquè aquest pugui saber correctament en tot moment, el nivell adequat de potència que ha de transferir en els motors.

El primer pas és treure les hèlix del motor, ja que els motors aniran a màxim rendiment durant un instant.

- Amb l'USB connectat activar el calibratge dels ESC.
- Posar el throttle(gas) de l'emissor al màxim.
- Connectar la bateria de l'equip. El LED blau, vermell i groc, s'encendran cíclicament.
- Amb el gas de l'emissor encara al màxim desconnectar la bateria i tornar-la a connectar.
- Desarmar el multicòpter polsant el polsador vermell.
- La placa controladora entre en mode calibratge de ESC.
- Esperar fins que els ESC emetin sons. El numero de tons significa el número de celes de la bateria.
- Posar el gas de l'emissor al mínim.
- Els ESC emetran un senyal sonor llarg indicant que s'ha calibrat el nivell mínim.

- Si s'ha calibrat correctament, després del so indicatiu de la correcta calibratge dels ESC es podrà provar de donar diferents nivells de gas observant la resposta dels motors.
- Finalment, posar el gas de l'emissor al mínim i desconnectar la bateria.

## **5.6. Mode de seguretat:**

Els modes de seguretat són molt importants en els multicòpters ja que aquests vehicles solen ser vehicles d'un cost considerat, i simples fallades de l'emissor o de bateria entre altres que les conseqüències podrien fer que aquest s'estavallés, es perdés de vista o fins i tot fer mal a algú.

Per tant el mateix firmware del multicòpter té incloses diverses opcions per si passés algun fallo que afectés al funcionament aquest pogués tornar al seu lloc, o parar el funcionament.

El primer problema a considerar és la fallada de l'emissor o la pèrdua de comunicació entre l'emissor i el multicòpter. Per resoldre aquest problema s'ha configurat el vehicle de la següent manera:

### **5.6.1. Mode de seguretat en fallada de l'emissor:**

El mode de seguretat es dispararà quan el pilot apagui l'emissor de control, el vehicle estigui fora de l'abast de la radiofreqüència o es trenquin els cables que connecten el receptor amb la placa controladora.

Tot i que s'activi el mode de seguretat, si el vehicle encara no ha arrencat el vol, és a dir no s'ha desarmat no passarà res. Si el vehicle està armat però es troba parat a terra sense enlairar-se, o esta en mode estabilitzador o acrobàtic amb el gas parat aquest automàticament pararà els motors. Si el vehicle està localitzat per GPS i s'ha iniciat amb el mode de vol ajudat per el GPS, el multicòpter tornarà a la posició inicial utilitzant les coordenades GPS. Si el multicòpter no té localització GPS, o està a menys de dos metres del lloc d'enlairada, o el paràmetre FS\_THR\_ENABLE està posat a "enabled always land", aquest baixarà a poc a poc fins arribar al terra.

S'ha parlat anteriorment, que es pot programar al multicòpter unes coordenades GPS, i aquest amb mode automàtic i anirà. En aquestes condicions si es perd la radiofreqüència, el multicòpter continuarà la missió si el paràmetre FS\_THR\_ENABLE esta posat a "Enabled Continue with Mission in Auto Mod". Si no és així seguirà els protocols mencionats anteriorment.

Si el multicòpter recupera la senyal de l'emissor, aquest no retornarà automàticament al mode de vol que estava abans de el mode de seguretat. Si es vol recuperar el mode normal de vol, l'usuari ha de canviar via emissor de mode i retornar en el desitjat.

Calibratge de seguretat a fallades:

El primer pas a seguir, és adequar el receptor a una fallada de senyal, ja que molts receptors guarden la ultima senyal rebuda i la van transmetent, cosa que fa impossible que el sistema ha perdut el senyal. Una de les maneres és baixar el PWM del gas de l'emissor a nivells més baixos dels normals, llavors la placa controladora ho detecta i

entra en mode de seguretat. L'altre mètode és configurar el receptor perquè no enviï senyal si es perd la comunicació amb l'emissor.

Un cop realitzat aquest pas, amb el programa mission planner, s'ha de configurar les opcions de fallada, marcades en la figura 5.8.

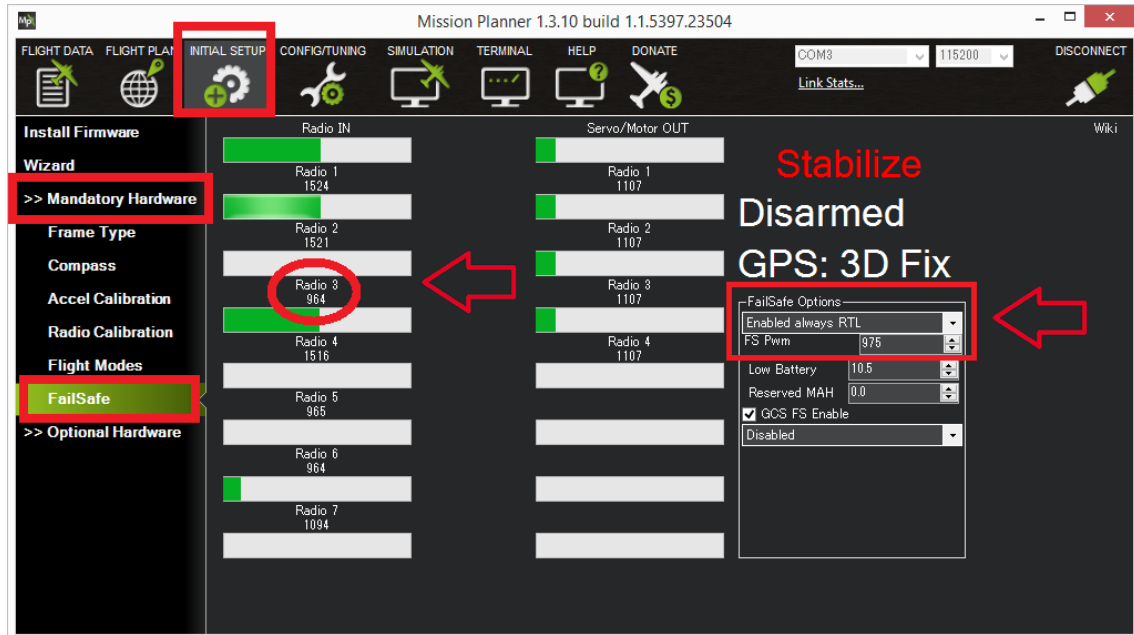


Fig. 5.8. Calibratge de mode de seguretat en fallada de l'emissor.

Hi ha tres opcions a escollir com a configuració:

- Activar sempre RTL (tornar al lloc d'inici).
- Activar sempre LAND (aterrar).
- Activar continuar amb la missió en mode automàtic.

S'observa també en la imatge la pestanya FS Pwm, aquesta opció només s'ha de configurar si el receptor s'ha posat en mode de baixar el PWM quan es perd la senyal. Es recomanable posar-lo 10PWM per sobre de quan l'emissor està desconnectat, i 10PWM per sota de quan l'emissor esta connectat.

### **5.6.2. Mode de seguretat de fallada de bateria:**

Aquest mode s'activarà quan la bateria o la capacitat d'aquesta baixi de uns valors pre establerts.

Un cop activat el mode de seguretat per bateria, les accions que realitzarà el vehicle seran les mateixes que anteriorment excepte quan es vola en mode automàtic, ja que el multicòpter en aquest cas no podrà seguir amb la missió i retornarà al lloc de sortida, i en el cas de mode de vol amb GPS controlat per l'emissor aquest no podrà tornar a la posició inicial, sinó que baixarà fins a terra lentament.

Per el calibratge d'aquest apartat primer ens hem d'assegurar que el mòdul de potència estigui configurat correctament. S'observa en la imatge 5.8 que en la pantalla de configuració de failsafe hi ha dos requadres per configurar el voltatge i la intensitat



en la qual aquest s'activarà. Un cop fet això s'ha d'escollir en la pestanya desplegable que s'observa en la imatge 5.8 sota el requadre on s'insereix la intensitat de tall si el mode de vol que ha de triar el multicòpter a de ser aterrar en el lloc on s'ha establert el mode de bateria baixa o retornar a la posició inicial.

### **5.6.3. Fallada de seguretat DCM/EKF.**

El DCM és un sistema que porten gairebé tots els vehicles aeris, el qual compara el rumb del GPS amb el rumb estimat del DCM. Quan aquesta comparació surt un resultat de una desviació de brúixoles de més de 60 graus es disparà el mode de seguretat.

El EKF és un algoritme per calcular la posició del vehicle segons la velocitat i l'orientació angular depenent dels giroscopis, acceleròmetre, brúixola, GPS, i els mesuraments de pressió baromètrica. Només s'activarà si el sistema EKF està sent utilitzat com a principal font d'estimacions d'altitud i posició i el paràmetre de la llista completa de paràmetres (AHRS\_EKF\_USE = 1). Si es compleixen totes aquestes característiques llavors el sistema disparà el mode de seguretat quan la variància de la brúixola i velocitat del EKF amb el GPS tinguin un valor més gran a 0.8 durant un segon. Aquest valor es pot modificar a la llista general de paràmetres EKF\_CHECK\_THRESH. Com més petit és aquest paràmetre de 0.1 a 1 més precís serà el mode de seguretat.

Aquest mode de seguretat es pot desactivar establint EKF\_CHECK\_THRESH=0, o bé DCM\_CHECK\_THRESH=0 com podem veure en el requadre marcat a la figura 5.9, en aquest cas amb un valor de 0.6.

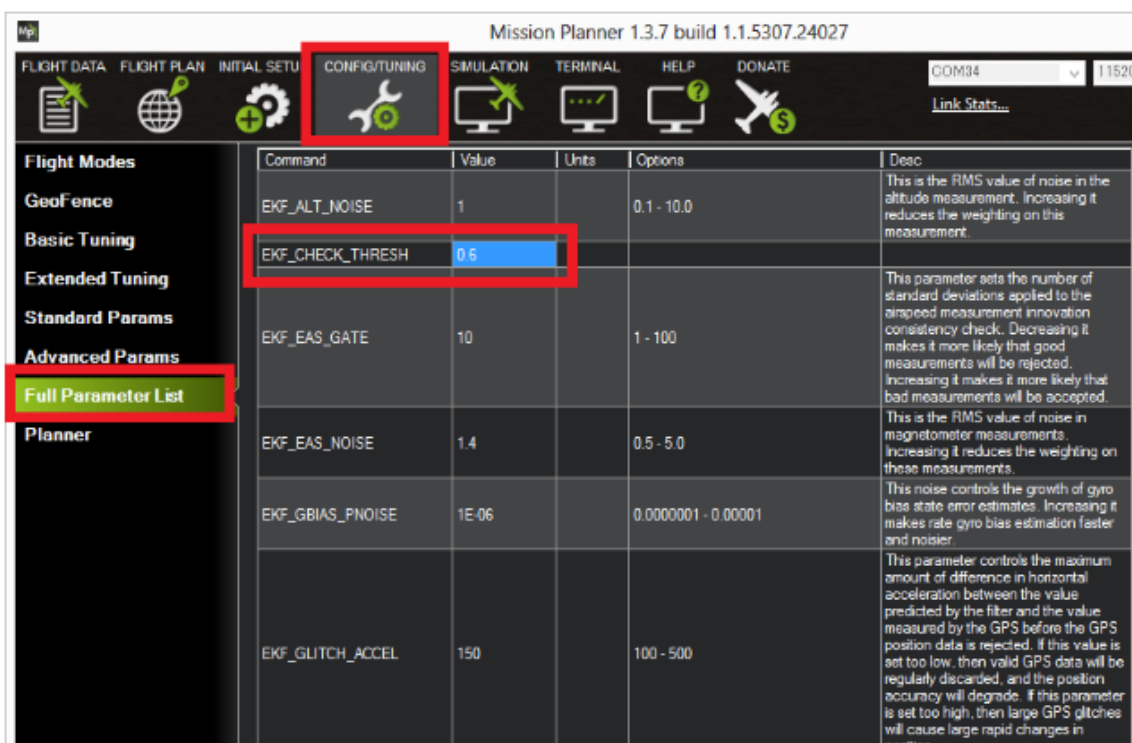


Fig. 5.9. Paràmetre per configurar el sistema DCM/EKF.

Si s'activa aquest mode de seguretat quan el multicòpter està en qualsevol mode que no utilitzi el GPS, no passarà res, simplement es prohibirà passar a mode GPS. Però si

el pilot està volant amb algun mode que utilitzi GPS, s'activarà el mode de seguretat, i aquest mode inhabilitarà el gas de l'emissor, ja que el farà baixar fins a terra lentament, però donarà a l'usuari control del pitch i el roll per posicionar-lo.

## **5.7. Calibratge emissora**

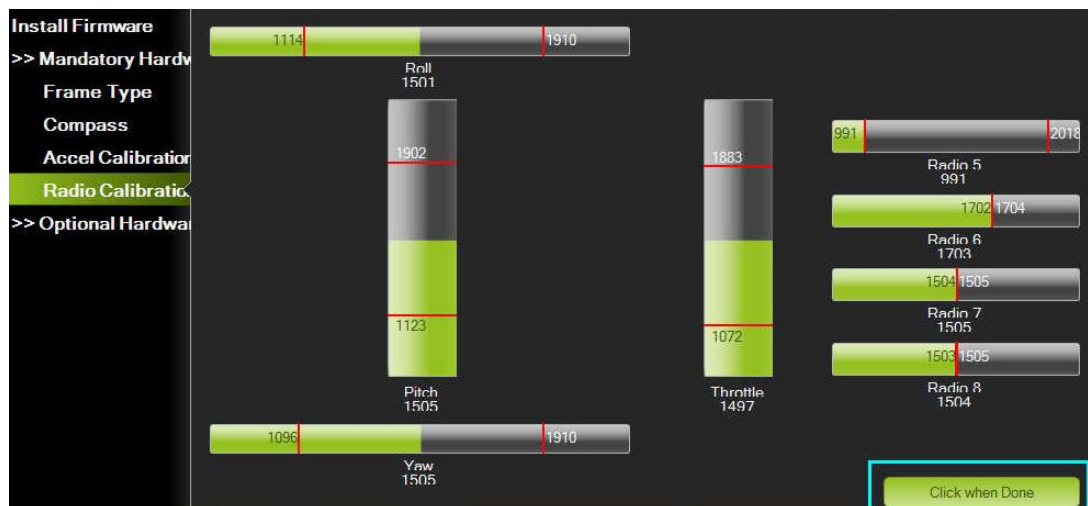


Fig. 5.9. Calibratge de la part de ràdio.

El calibratge de l'emissora és un dels paràmetres obligatoris ja que el seu funcionament és la base del sistema. El que farem amb el calibratge a través de software serà ajustar els punts màxims i mínims dels recorreguts dels sticks, d'aquesta manera el controlador podrà saber el percentatge d'energia que ha d'utilitzar o gestionar.

### Condicions de seguretat

Per raons de seguretat i poder evitar possibles accidents ens assegurarem d'haver desmuntat les hèlix dels motors prèviament.

Per realitzar el calibratge connectarem el nostre multicòpter al software, activarem l'emissora i polsarem el botó "Calibrar Radio", a partir d'aquí ens apareixeran gràficament unes línies vermelles sobre els gràfics dels valors PWM de l'emissora.

A base d'anar movent tots els seus sticks al seu tope de maniobra veurem que les línies vermelles es posicionen als màxims i als mínims de cada moviment.

Un cop fet tornarem a polsar el botó inicial, el programa ens mostrarà els valors màxims i mínims de PWM registrats, el rang normal és que els valors oscil·lin entre 1100 i 1900.

## **5.8. Modes de vol**

Els models de vol s'han de tenir molt en compte ja que aquests faran que el drone es comporti d'una manera o altra. Depenent del multicòpter i la finalitat del vol escollirem el mode més adient.



En cas de mode acrobàtic, tenim el mode acro, el qual no estabilitza el nostre drone i per tant aquest es mantindrà en la posició en el que el guiem. És molt útil per fer flips i acrobàcies mentre es pilota a través de FPV.

El nostre controlador ens permet volar en 18 modes diferents, tot i això d'aquests 18 els més habituals que utilitzarem seran 5:

- **Stabilize:** Aquest mode permet volar en mode manual, tot i això els eixos roll i pitch s'estabilitzen.
- **Alt Hold:** Es manté una altitud consistent mentre que els diferents eixos es poden moure amb normalitat. Mentre es mantingui el gas a un nivell entre 40 i 60% l'altitud es mantindrà, si s'incrementa o es disminueix el nostre multicòpter variarà l'alçada.
- **Loiter:** En aquest mode mantindrem la posició, orientació i alçada . Es pot pilotar el drone en mode manual fins que s'alliberen els sticks, llavors aquest es manté intacte a l'aire.
- **RTL (Return to launch):** Quan encenem el nostre multicòpter abans d'empendre el vol, aquest s'inicialitzarà i guardarà en memòria la posició de sortida, en cas d'establir aquest mode el multicòpter tornarà autònomament a la posició d'on s'ha enlairat. El drone s'alçarà fins a l'altitud especificada al paràmetre RTL\_ALT, en cas de que sigui superior aquest mantindrà l'alçada.

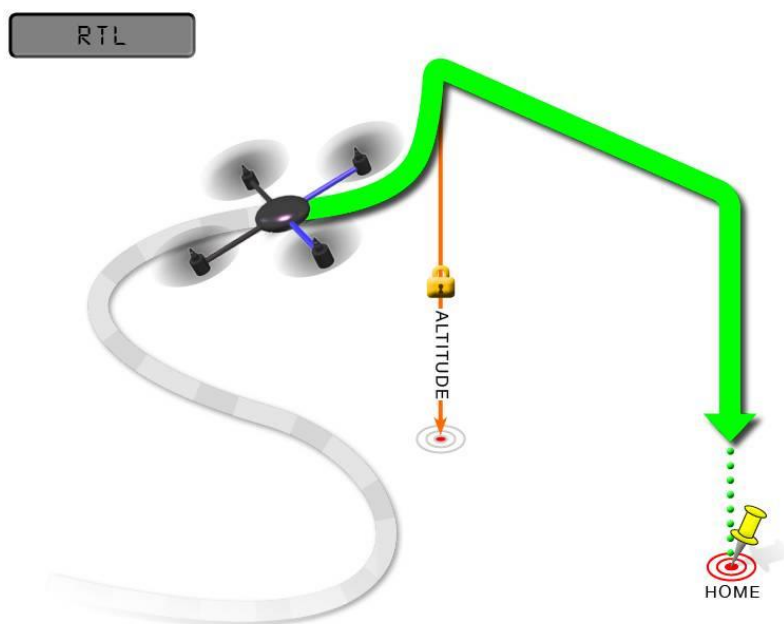


Fig. 5.10. Esquema mode de vol RTL.

- **Auto:** Mode en el que controlarem a través del PC el vol establint l'alçada desitjada i els punts d'orientació (waypoints).

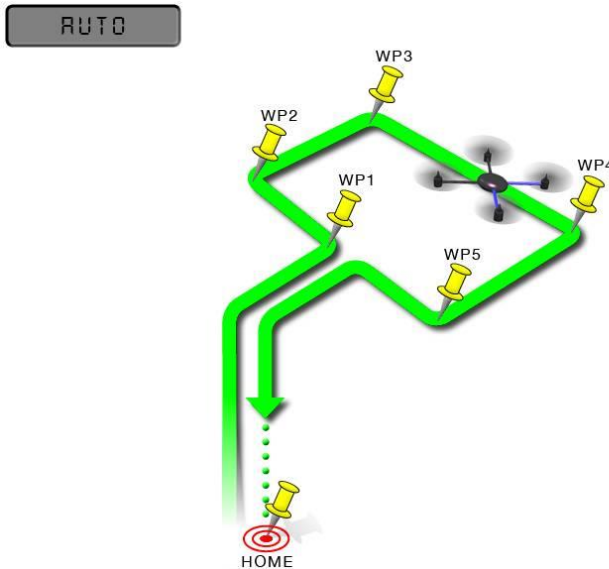


Fig. 5.11. Esquema mode de vol AUTO.

En el nostre cas que volem fer fotografia i enregistrament de vídeos hi ha altres modes interessants com per exemple el circle, aquest un cop enlairat el drone, si l'activem girarà en cercle apuntant de cara al centre i amb el radi especificat al paràmetre CIRCLE\_RADIUS. Només podrem accelerar per augmentar o disminuir l'alçada.

## 5.9. Configuració Gimbal

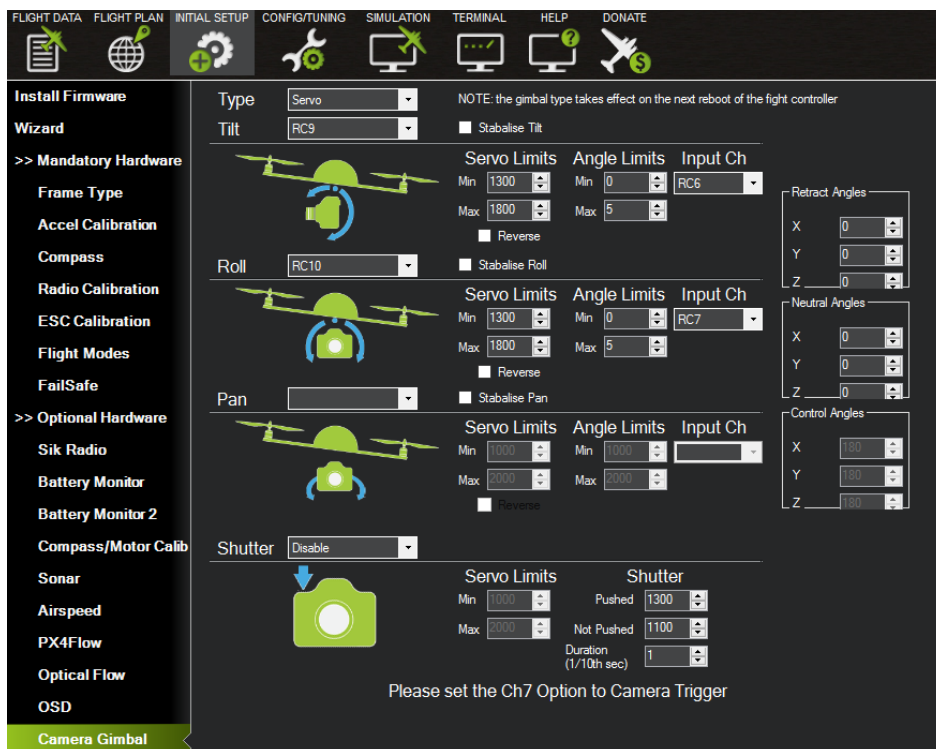


Fig. 5.12. Pantalla configuració gimbal.

El nostre gimbal permet els moviments de tilt i roll cosa que fa que a ple vol puguem inclinar la càmera endavant o als costats desde l'emissora.

Per fer això utilitzarem les sortides auxiliars establint els valors mínims i màxims dels motors. Tenim diferents tipus de configuracions de gimbal, en el nostre cas l'utilitzem com a Servo.

Com es pot veure a la imatge anterior seleccionem RC9 per a tilt i RC10 per a roll, aquestes seran les sortides i estaran controlades per RC6 i RC7 respectivament, aquests seran els canals de l'emissora. Un cop configurat provarem amb valors estàndard el moviment del gimbal, en el nostre cas teníem problemes d'inestabilitat i feia tope quedant els motors forçats, per solucionar aquest problema vam variar els valors mínim i màxims de les sortides:

Min: 1300, Max: 1800

El poder moure el gimbal a través del controlador no vol dir que aquest quedi lliure, nosaltres podrem moure fins a la posició desitjada i aquest continuarà estabilitzant evitant tremolors i moviments bruscos del multicòpter.

## **5.10. Configuració MicroOSD**

Dins del sistema d'imatge tenim un component que ja hem explicat anomenat OSD, aquest ens enviarà a temps real les dades del vol, per fer això haurem de configurar-ho al controlador des del software. Depenent del component alguns OSD ja ens agafaran la configuració automàticament, en el nostre cas vam haver de variar paràmetres avançats:

SR2_EXTRA1	2
SR2_EXTRA2	2
SR2_EXTRA3	2
SR2_PARAMS	0
SR2_POSITION	2
SR2_RAW_CTRL	2
SR2_RAW_SENS	2
SR2_RC_CHAN	2

Fig. 5.13. Pantalla configuració OSD.

## **5.11. Mòdul de potència**

Per poder supervisar el voltatge i corrent de la bateria utilitzem el mòdul de potència com hem pogut veure anteriorment. Tot i això per poder-ho monitoritzar correctament haurem d'especificar el mòdul que utilitzem a "configuració"> "software opcional". Allà establirem que volem monitoritzar tant voltatge com amperatge amb un mòdul per a pixhawk. En alguns casos el mòdul s'ha de calibrar, però al connectar-lo vam veure que marcava correctament:

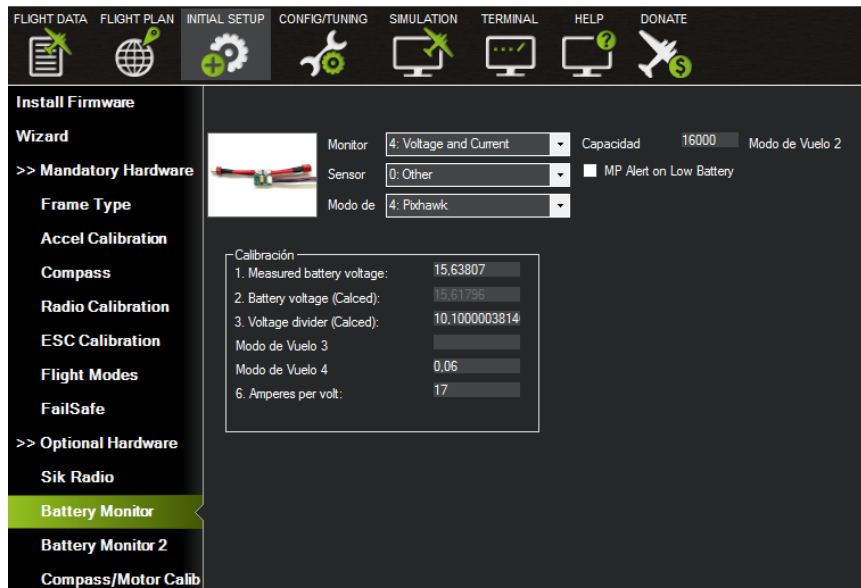


Fig. 5.14. Pantalla configuració mòdul de potència.

## Capítol 6

### Galeria del muntatge

Un cop s'han obtingut totes les peces necessàries per muntar l'estructura del nostre multicòpter s'ha procedit a muntar-lo. Al dissenyar les peces s'ha tingut en compte tots els forats pels quals havia d'anar collada l'estructura, o que eren necessaris per l'estructura i això ha fet que no s'hagi hagut d'afegir forats imprecisos amb el trepant o alguna eina similar. Tot i així és un muntatge molt laboriós i s'ha d'anar amb molt de compte ja que una petita desviació pot afectar al resultat final.

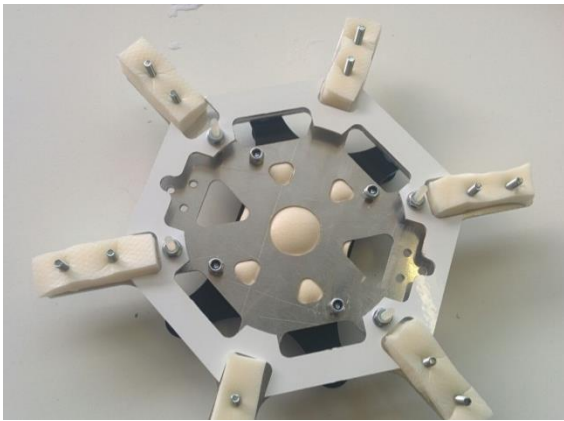


Fig. 6.1. Muntatge d'estructura amb espuma per la vibració

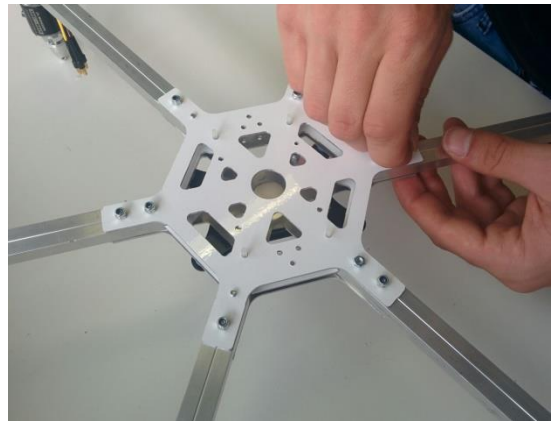


Fig. 6.2. Muntatge dels braços.



Fig. 6.3. Muntatge motor en el seu suport.

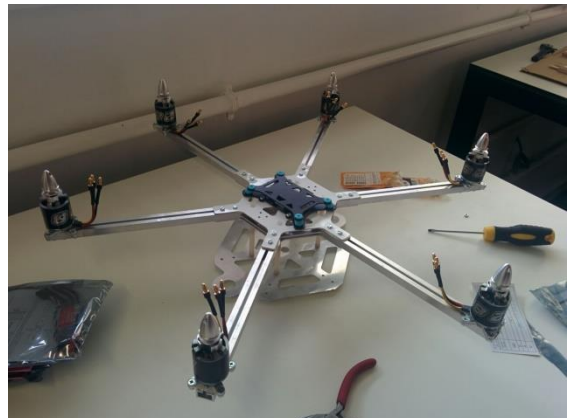


Fig. 6.4. Estructura final sense tren d'aterratge.

Tots els cargols els quals collen l'estructura han estat collats amb femelles antiroscants, per d'aquesta manera a causa de la vibració no es descollés l'estructura. També cal dir que en diversos elements on la vibració és crítica s'ha posat espuma de làtex per amortitzar les vibracions. Aquest és el cas del contacte dels braços amb la placa principal, del suport de la controladora amb la placa principal i de la subjecció de els ESC amb els braços, ja que al ser un contacte directa amb una peça electrònica hi ha possibilitat de que es faci malbé. També s'ha anat amb compte a l'hora de collar tots els cargols, ja que al ser estructura d'alumini, una força massa elevada d'aquests podria deformar alguna part de l'estructura. S'ha de comentar que hi ha varies parts



que van enganxades amb additius químics, com són les juntes impreses amb 3D amb les seves respectives barres. Veiem en les imatges següents diferents parts del muntatge:



Fig. 6.5. Repàs i neteja de les peces després del fresat.



Fig. 6.6. Col·locació peça impresa del tren d'aterratge.

Els motors s'han de preparar per ser muntats a l'estructura, abans se li han de collar els accessoris (suports motor – estructura i motor – hèlix), per assegurar que els cargols no es descol·len a causa de les vibracions hi posem fixador:



Fig. 6.7. Aplicació de fixador als cargols.

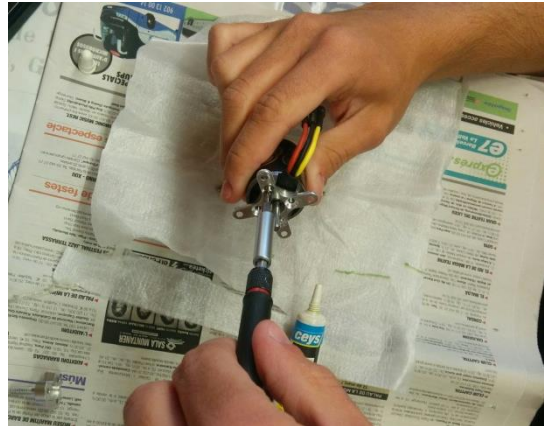


Fig. 6.8. Muntatge dels suports de motor.



Fig. 6.9. Motors apunt per ser muntats a l'estructura.



Fig. 6.10. Instal·lació d'alimentació dels ESC i del BEC.

Com es pot observar a la figura anterior (6.10), connectem cada un dels ESC amb un cable distribuïdor (6 positius i 6 negatius) el qual anirà connectat a la bateria, també soldat a aquest distribuïdor tenim un petit cable que alimentarà el BEC.

Un cop connectats els ESC als cables d'alimentació, es connectaran els motors. A la vegada també connectarem tots els perifèrics al controlador tal i com es pot veure als esquemes dels diferents capítols.

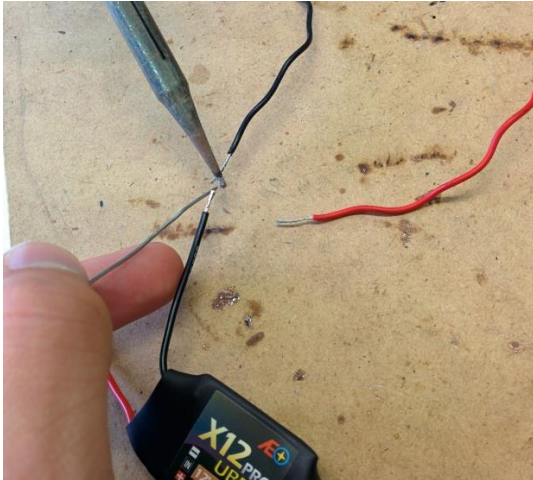


Fig. 6.11. Soldant els cables d'alimentació al BEC.

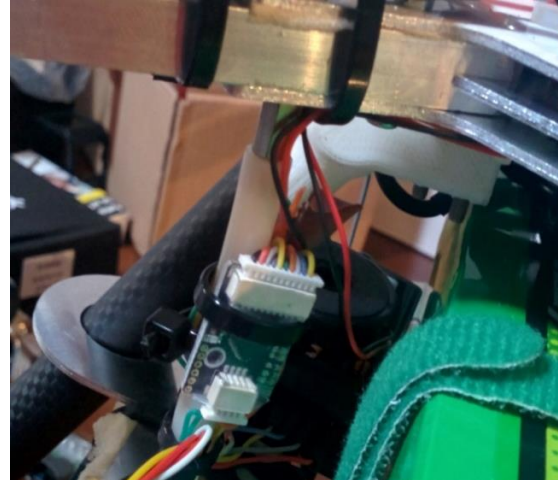
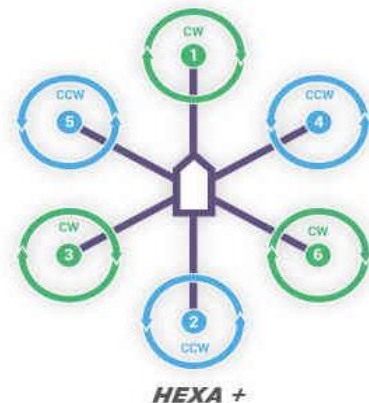


Fig. 6.12. Encoder PPM connectat i muntat al drone.

Un cop muntat el Pixhawk amb tots els accessoris (zumbador, switch, telemetria i GPS) també hi hem de connectar els motors, cada motor ha de seguir la numeració que ens dona ardupilot, per exemple, el motor 1 anirà connectat a la sortida 1. Com veiem en l'esquema, aquests motors han de seguir un sentit de gir per el correcta funcionament.



A la figura 6.13 podem observar el connexionat dels motors:

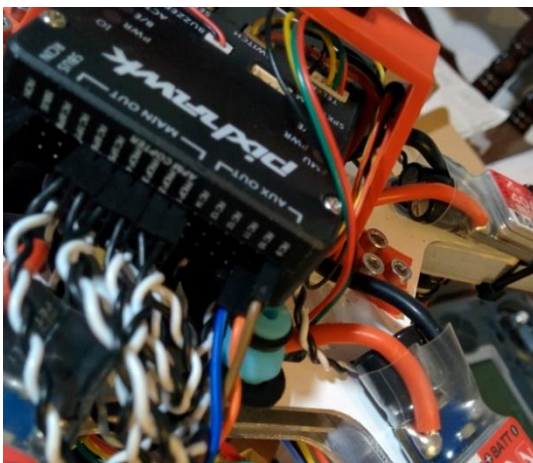


Fig. 6.13. Connexions Pixhawk.

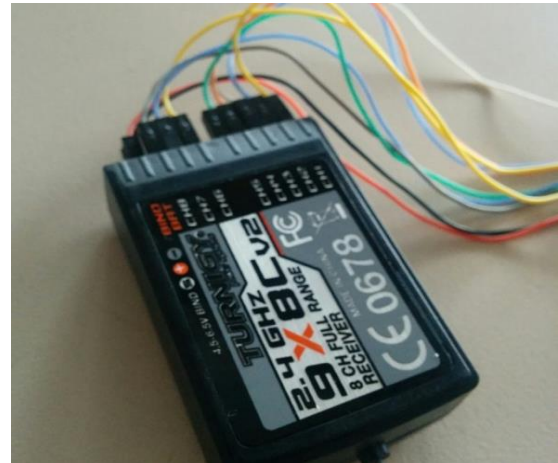


Fig. 6.14. Receptor de radio, sortides PWM connectades.



Cada component porta el seu connector, en alguns casos estaran pensats per anar en conjunt però la majoria de cops ens trobarem que hem de canviar connexions i connectors, en la major part dels casos hem fet servir connectors XT60, tot i això hi ha components amb altres tipus com la bateria que porta un connector del tipus banana 5mm (Fig 6.16).

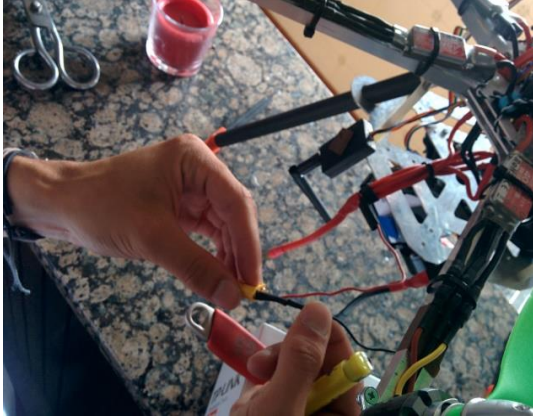


Fig. 6.15. Soldant connector accessoris – mòdul potència.

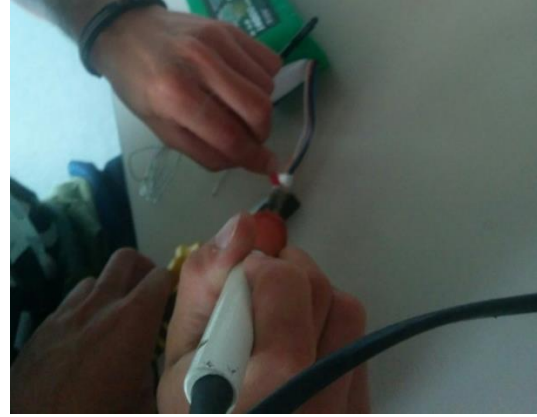


Fig. 6.16. Soldant connectors bateria.

Un cop muntats tots els components és molt important fer les primeres configuracions i proves sense hèlixs per evitar possibles accidents. Finalment després de rebre el material del tren d'aterratge (tubs de fibra), vam poder muntar-lo i instal·lar el gimbal ja que necessitàvem que l'estructura estigués aixecada.



Fig. 6.17. Drone muntat sense hèlix ni suport de GPS



Fig. 6.18. Drone muntat amb tren d'aterratge



## **6.1. Pes total del sistema.**

Un cop arribat s'ha completat el muntatge sencer de l'equip s'ha procedit a pesar-lo. El resultat ha estat de 3310g

Material	Pes
Estructura mecànica	527g
Estrucutra electrònica	2511,9g
Extres ( cargols, adhesius, cables)	271,1g
<b>TOTAL</b>	<b>3310g</b>

Taula 13. Pes total del sistema.

Com podem observar a la taula en el sistema tenim 271.1g de extres. Aquest extres tant poden ser cargols, com cables i altres. Tot i fer els càlculs de motors per un sistema de 3kg, no hi ha problema en tenir un sistema de 3.31kg ja que s'ha deixat molt marge de seguretat I s'ha calculat una càrrega extra d'aproximadament 3kg.

# Capítol 7

## Costos

En aquest projecte tenim 2 tipus de cost, humà i material.

Cal dir que el cost humà serà relativament elevat ja que estem desenvolupant un prototip i com tot hi ha hagut una recerca d'informació prèvia, elecció i comparació de components, disseny i diferents contratemps propis d'un projecte.

Hem fet una planificació amb "Project" la qual ens ha permès gestionar el recursos i hores dedicats amb l'objectiu de poder tenir un cost real.

### Recursos humans

Hem estructurat el projecte en diferents tasques segons la duració d'aquestes i en un ordre temporal, aquestes tasques aniran precedides les unes de les altres excepte la confecció de la memòria que s'anirà fent al llarg de tot el projecte.

Tota la part que involucra el treball i que no estaria dins d'un projecte no l'hem comptat com a cost, això seria el relatiu a la proposta i redacció del treball, el projectes s'han de redactar però ho hem contemplat com a feina de confecció d'estudi previ, definició de característiques i també dins del disseny.

Com a recursos humans, hem comptat dos enginyers, amb un preu hora no gaire elevat, però per a un projecte així comptant que és un prototip i s'hi ha de dedicar moltes hores ens hem d'ajustar al màxim possible:

<i><b>Nom</b></i>	<i><b>Preu hora</b></i>
Enginyer 1	18€ / hora
Enginyer 2	18€ / hora

Taula 14. Preu enginyer hora.

<i><b>Nom</b></i>	<i><b>Cost real</b></i>	<i><b>Cost</b></i>	<i><b>Variació de cost</b></i>
Confecció proposta TFG	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Presentació Proposta TFG	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Confecció estudi previ, definició característiques	0,00 €	306,00 €	306,00 €
Disseny estructural i electrònic	0,00 €	459,00 €	459,00 €
Selecció i comanda de material	0,00 €	396,00 €	396,00 €
Construcció estructura mecànica	0,00 €	756,00 €	756,00 €

Muntatge electrònic, programació i test	0,00 €	1.413,00 €	1.413,00 €
Muntatge final, calibratge i proves de vol	0,00 €	1.152,00 €	1.152,00 €
Confecció de la memòria	0,00 €	0,00 €	0,00 €

Taula 15. Cost humà.

Fent tota la temporització de les setmanes hem calculat el següent cost a partir de les hores dedicades a cada tasca:



Fig. 7.1. Definició cost humà.

Aquest cost humà, hem de pensar que si s'hagués de fer reproduccions del drone seria molt menor ja que no hi hauria cost de desenvolupament, disseny ni elecció de materials i la construcció seria molt més ràpida i metòdica.

### **Recursos materials**

Aquests són els recursos que s'han emprat en la construcció del multicòpter, aquest material s'ha comprat per internet excepte l'alumini. El fet de comprar els materials a fora han fet que puguem tenir un preu molt competitiu sempre respectant la qualitat i fiabilitat dels materials.

A continuació una relació de components i preus:

COMPONENT	QTT.	PREU/U	PREU TOTAL
CONTROLADOR + ACCESSORIS	1	134,64 €	134,64 €
GIMBAL 2 EIXOS	1	32,45 €	32,45 €
XAPA ALUMINI 6060	1	5,32€	5,32€
PERFIL ALUMINI 6060 1,5M	1	2,35€	2,35€

FPV CAM	1	7,94 €	7,94 €
FPV TRANSMITTER	1	16,95 €	16,95 €
ULLERES FPV	1	61,54 €	61,54 €
TUB RODÓ FIBRA CARBONI	2	3,44 €	6,88 €
TUB QUADRAT FIBRA CARBONI	3	1,95 €	5,85 €
HÈLIX MOTORS CCW	2	2,87 €	5,74 €
HÈLIX MOTORS CW	2	2,78 €	5,56 €
EMISSORA	1	68,83 €	68,83 €
CARREGADOR BATERIA	1	15,73 €	15,73 €
CABLE 5.5 A CARREGADOR	1	3,46 €	3,46 €
CABLE 5.5 A 6 CABLES PER ESC	1	5,05 €	5,05 €
CONNECTOR 4MM (10 PARELLS)	1	3,34 €	3,34 €
CONNECTOR JST MASCLE	1	1,11 €	1,11 €
CONNECTOR JST FEMELLA	1	1,10 €	1,10 €
CABLE VERMELL SILICONA 12AWG	1	2,37 €	2,37 €
CABLE NEGRE SILICONA 12AWG	1	2,37 €	2,37 €
MOTORS	7	16,33 €	114,28 €
ACCESSORIS MOTORS	7	1,87 €	13,10 €
BATERIA	1	67,00 €	67,00 €
ESPUMA ANTIVIBRACIÓ BLANCA	2	1,47 €	2,93 €
ALARMA BATERIA	1	2,24 €	2,24 €
CABLE SILICONA GROC	1	2,92 €	2,92 €
CONNECTORS MOTORS	2	1,86 €	3,71 €
BATERIA EMISORA	1	12,62 €	12,62 €
CONNECTORS BATERIA	1	4,32 €	4,32 €
ESC	7	13,04 €	91,29 €
MICRO OSD PARA PIXHAWK PX4	1	21,00 €	21,00 €
BEC ESTABILIZADO 12V 3ª (ENTRADA 4S-6S)	1	9.90€	9.90€
<b>TOTAL MATERIAL</b>			<b>723,99 €</b>

Taula 16. Cost material.

Cal dir que alguns dels materials com els connectors, alumini etc. Venen per defecte en més quantitat de la que necessitem, per tant, si haguéssim de fer diversos drones el cost se'ns veuria reduït. També el demanar material en més quantitat faria que abaratíssim costos.

### Cost total projecte

Si sumem tots els recursos utilitzats tenim un cost total del projecte:

Cost humà	4.482,00€
Cost material	723,99€
<b>TOTAL PROJECTE</b>	<b>5.205,99€</b>

Taula 17. Cost total.

# Capítol 8

## Millores

Les millores que es presenten per el nostre projecte, encarades cap a un projecte futur serien les següents:

- Introduir al sistema un conjunt de sensors d'ultrasons. D'aquesta manera aconseguiríem que en el vol en pilot automàtic el multicòpter podria ser més eficaç i esquivar obstacles. També serviria en el cas d'un mal pilotatge per evitar que el multicòpter pugui col·lisionar amb algun obstacle.



Fig. 8.1. Sensor d'Ultrasons

- Afegir al sistema una estructura de paracaigudes activada per un relé extern, el qual en fallada de l'equip aquest s'activés. D'aquesta manera s'aconseguiria molta més seguretat en vol.



Fig. 8.2. Hexacòpter amb paracaigudes

- Canviar el tren d'aterratge estàtic per un tren d'aterratge retràctil. Ja que per la gravació, la càmera tindria més angle de moviment i no tindríem problemes que ens sortís a la imatge el tren d'aterratge.
- Canviar al sistema de l'estructura dels braços per un sistema de braços retràctils. D'aquesta manera facilitaria molt el transport del vehicle.



Fig. 8.3. Tren d'aterratge retràctil

Finalment apart del hardware comentat anteriorment com a millora, es vol presentar com a futur projecta més complex un sistema de tractament d'imatge. Aquest sistema de tractament serviria per agafar un patró d'imatge i realitzar un seguiment d'aquesta imatge. Això serviria per exemple per seguir cotxes o altres objectes els quals se'ls i pogués posar un patró visible i d'una mida suficientment gran com per poder ser reconeguda per el sistema de tractament d'imatge.

Pixhawk comercialitza una càmera pensada per poder desenvolupar aplicacions relacionades amb el tractament d'imatges, aquesta càmera ja porta incorporat el sensor d'ultrasons, es comercialitza amb el nom de PX4 Flow:

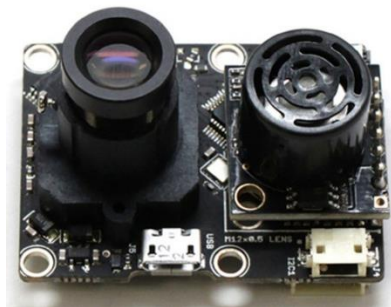


Fig. 8.4. Càmera PX4 Flow.

# Conclusions:

Com a conclusions, volem remarcar que s'ha complert tots els objectius que es van plantejar a l'inici del projecte. S'ha construït un vehicle aeri no tripulat per gravació d'imatges completament funcional amb un abast definit per l'emissora o l'autonomia de l'equip.

Amb els càlculs que s'han plantejat en el capítol 5, es demostra teòricament que l'equip compleix amb les especificacions inicials de temps de vol superior a 10 minuts i s'ha augmentat un 50%, fins a 15,23 minuts.

Per el que fa els materials escollits, aquests han estat la fibra de carboni, PLA i alumini 6060. Cada un d'aquest ha estat utilitzat segons la funció que hauria de fer dins del sistema i la manera de treballar-lo. Es demostra en el capítol 3 que l'estructura és poc flexible i té una gran resistència. S'ha pogut fabricar totes les peces que s'han cregut necessàries amb les eines de la universitat. En quan a pes de l'equip, el pes de les peces de l'estructura mecànica és de 527g, el pes de tots els components electrònics és 2.511kg i el pes total de l'equip muntat és de 3.310kg, per tant s'ha aconseguit el propòsit inicial de un pes inferior a 5kg i de manera molt satisfactòria.

Per el que fa la càrrega útil de l'equip, els càlculs s'han pensat per portar càrregues de fins a 3kg amb molt marge de seguretat. Tot i així per temes de major consum, es recomana reduir aquesta càrrega fins a 2Kg de pes.

Pel que fa al consum dels motors s'ha trobat amb càlculs que es necessitava uns motors de 303W de potència. Finalment els escollits en configuració de la bateria 3S poden arribar a una potència màxima de 295, i en 4S que és la configuració escollida 530W. S'ha augmentat la potència dels motors, ja que d'aquesta manera no aniran tant forçats i podrem portar més càrrega.

Si veiem el cost total de 5205.99€ pot semblar molt elevat, però tal i com hem justificat, ara tenim un prototip que podria ser reproduït en molt menys temps, pel que tenint el disseny, material i tota l'electrònica definida podríem fer clons per uns 1000€ comptant que si féssim una producció en cadena podríem abaratir molt més. Tot i això, aquest no és un projecte destinat a una producció massiva sinó que està destinat a crear un producte específic per a un client, per suposat si el client volgués fer-ne una producció en cadena es podria.

Si comparem amb drons actuals que hi ha al mercat, el nostre sistema és totalment flexible pel que podem incloure-hi tants perifèrics com vulguem, així com fer programacions concretes (codi obert) per poder integrar noves característiques o elements exteriors.

Podem trobar drons al mercat amb característiques similars però no s'assemblen del tot al nostre sistema ja que podem fer missions en autònom i a més pilotem a través d'unes ulleres FPV, a part de la flexibilitat com hem explicat anteriorment. També tenim uns motors molt més potents que la mitjana del mercat el qual ens permet fer maniobres ràpides i àgils tot i el pes de la nau i amb un consum molt baix (gran autonomia).

Com a comparativa de mercat trobem el Walkera H500 però com dèiem no té tantes característiques com el nostre i conté un sistema totalment tancat. Aquest drone surt sobre uns 1400€, per tant abaratiríem molt més el cost i tenim un multicòpter amb moltes més característiques (inclús control a través de smartphone) i un sistema totalment flexible que en qualsevol moment es podria modificar per a fer la funció que desitgem.

Per últim ens agradaria remarcar tot el temps i dedicació el qual ens hem passat construint i muntant el multicòpter, ja que és una de les tasques que costa més de demostrar. També dir que entre els dos integrants del grup hi ha hagut una total comunicació i una perfecte relació i repartiment de la feina durant tot el projecte. Finalment dir que estem molt contents d'haver aconseguit superar aquest repte perquè com se sap, fer volar una estructura és molt complicat, ja que entren en joc molts factors difícils de tenir en compte, i més si es crea l'estructura des de zero.



# Bibliografia.

Wiley, Simon Newman and John M. Seddon, *Basic Helicopter Aerodynamics*, 3rd Edition, 2011

<https://www.safaribooksonline.com/library/view/basic-helicopter-aerodynamics/9781119972723/chapter02.html>

Normativa de vol a l'estat espanyol:

[http://www.seguridadaerea.gob.es/media/4389070/ley\\_18\\_2014\\_de\\_15\\_octubre.pdf](http://www.seguridadaerea.gob.es/media/4389070/ley_18_2014_de_15_octubre.pdf)

Característiques PLA:

[www.tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es](http://www.tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es)

Comparativa de controladors:

<https://3dr.com/wp-content/uploads/2013/05/Product-comparison-matrix-Sheet2-3.jpg>

Característiques alumini 6060.

[http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa\\_6060\\_aluminio.pdf](http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_6060_aluminio.pdf)

Propietats dels materials:

<http://www.areatecnologia.com/TUTORIALES/PROPIEDADES%20DE%20LOS%20MATERIALES.htm>

PLA:

<http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>

Característiques fibra de carboni:

<https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/17156-Carbono-y-Aramida-del-concepto-a-la-produccion.html>

Propietats mecàniques dels materials:

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TEMII.2.7.PROPIEDADESMECANICAS.pdf>

Història dels VANT:

<http://www.abc.net.au/news/2013-03-01/drone-wars-the-definition-dogfight/4546598>

Calculadora vehicles rc:

<http://www.ecalc.ch/index.htm>

Datasheet transmissor FPV:

[http://www.personal-drones.net/wp-content/uploads/2013/08/RC832\\_English.pdf](http://www.personal-drones.net/wp-content/uploads/2013/08/RC832_English.pdf)

Manual emissora:

<http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uploads/544272942X226591X16.pdf>

[http://www.modeltronic.es/download/turnigy\\_9x\\_9ch.pdf](http://www.modeltronic.es/download/turnigy_9x_9ch.pdf)

Datasheet GPS:

[https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8\\_DataSheet\\_\(UBX-13003366\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8_DataSheet_(UBX-13003366).pdf)

Guia Pixhawk:

<http://www.dronetrest.com/t/pixhawk-quickstart-guide-manual/1283>

Manual ulleres FPV:

<http://img.banggood.com/file/products/20160127011707Eachine%20VR-007%20manual.pdf>

Manual i datasheet telemetria:

<https://3dr.com/wp-content/uploads/2013/10/3DR-Radio-V2-doc1.pdf>

Datasheet ESC:

<http://imgmgr.banggood.com/images/upload/2014/09/SPIDER%20%20V2-Series%20Air%20ESC%20Uaser%20Manual.pdf>

Manual Pixhawk:

<https://es.scribd.com/document/203087482/Pixhawk-Manual-Rev3-3>

Diagrama Pixhawk:

[https://pixhawk.ethz.ch/\\_media/software/pixhawk-block-diagram.pdf](https://pixhawk.ethz.ch/_media/software/pixhawk-block-diagram.pdf)

Informació abans de comprar un drone:

<http://www.zekidar.com/los-drones/>

Com muntar un drone:

<http://www.xataka.com/especiales/como-montar-tu-mismo-un-dron-de-carreras-por-poco-dinero-guia-de-compras>

Connexió PPM Pixhawk – turnigy 9x:

<http://www.dronetrest.com/t/turnigy-9x-connecting-ppm-to-cc3d/1364/2>

Recomanacions ús drone:

[http://www.seguridadaerea.gob.es/media/4427085/recomendaciones\\_uso\\_drones.pdf](http://www.seguridadaerea.gob.es/media/4427085/recomendaciones_uso_drones.pdf)

Electrònica de vol – drone:

<http://vueloartificial.com/introduccion/primeros-pasos/la-electronica-de-vuelo/>

# **ANNEX**

## **ANNEX 1: Normativa de vol a l'estat espanyol**

Artículo 47. *Medidas compensatorias en materia de calidad acústica.*

Los gestores aeroportuarios asumen los costes derivados de las medidas compensatorias en materia de calidad acústica para los municipios derivadas de lo previsto en el artículo cuarto, apartado 2, letra b), de la Ley 48/1960, de 21 de julio, de Navegación aérea.

Artículo 48. *Modificación de los anexos.*

Cualquier propuesta del gestor aeroportuario de modificación de los anexos de esta Ley relativos a la metodología para la determinación del ingreso máximo anual por pasajero (IMAP) en el Documento de Regulación Aeroportuaria (DORA) quinquenal y a la determinación del ingreso máximo anual por pasajero ajustado (IMAAJ) estará sujeta a un procedimiento de consulta previo con las asociaciones representativas de usuarios, cuya duración no podrá ser inferior a dos meses, en el que Aena, S.A., les facilitará información suficiente para valorar la propuesta y su impacto sobre las modificaciones tarifarias.

Con el resultado de las consultas Aena, S.A., formulará nueva propuesta en la que deberá ponerse de manifiesto cómo se han tomado en consideración los puntos de vista de las compañías usuarias y justificar su decisión en caso de desacuerdo, y de la propuesta adoptada se dará traslado al Ministerio de Fomento que, en su caso, recabará informe de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia sobre la propuesta.

Artículo 49. *Incentivos comerciales.*

1. Lo dispuesto en las secciones 1.<sup>a</sup> a 4.<sup>a</sup> de este capítulo no obsta a que Aena, S.A., pueda establecer incentivos comerciales que, sin afectar al régimen jurídico y cuantía de las prestaciones patrimoniales públicas por los servicios aeroportuarios básicos, se fijen conforme a criterios objetivos, transparentes y no discriminatorios y sean conformes con las normas sobre competencia.

En ningún caso dichos incentivos afectarán al cálculo de los ingresos regulados requeridos a que se refieren dichas Secciones.

2. La propuesta de Documento de Regulación Aeroportuaria (DORA) que Aena, S.A., someta a consultas y la que, tras estas, remita a los órganos correspondientes, debe recoger los esquemas de incentivos previstos para el quinquenio.

*Sección 6.<sup>a</sup> Aeronaves civiles pilotadas por control remoto*

Artículo 50. *Operación de aeronaves civiles pilotadas por control remoto.*

1. Hasta tanto se produzca la entrada en vigor de la norma reglamentaria prevista en la Disposición final segunda, apartado 2, de esta Ley, las operaciones de aeronaves civiles pilotadas por control remoto quedan sujetas a lo establecido en este artículo.

El cumplimiento de lo dispuesto en este artículo no exime al operador, que es, en todo caso, el responsable de la aeronave y de la operación, del cumplimiento del resto de la normativa aplicable, en particular en relación con el uso del espectro radioeléctrico, la protección de datos o la toma de imágenes aéreas, ni de su responsabilidad por los daños causados por la operación o la aeronave.

2. Las aeronaves civiles pilotadas por control remoto cuya masa máxima al despegue exceda de 25 kg deben estar inscritas en el Registro de matrícula de aeronaves y disponer de certificado de aeronavegabilidad, quedando exentas del cumplimiento de tales requisitos las aeronaves civiles pilotadas por control remoto con una masa máxima al despegue igual o inferior.

Además, todas las aeronaves civiles pilotadas por control remoto deberán llevar fijada a su estructura una placa de identificación en la que deberá constar, de forma legible a simple vista e indeleble, la identificación de la aeronave, mediante la designación específica y, en su caso, número de serie, así como el nombre de la empresa operadora y los datos necesarios para ponerse en contacto con la misma.

3. Podrán realizarse actividades aéreas de trabajos técnicos o científicos por aeronaves civiles pilotadas por control remoto, de día y en condiciones meteorológicas visuales con sujeción a los siguientes requisitos:

a) Sólo podrán operar en zonas fuera de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre, en espacio aéreo no controlado, más allá del alcance visual del piloto, dentro del alcance de la emisión por radio de la estación de control y a una altura máxima sobre el terreno no mayor de 400 pies (120 m), las aeronaves civiles pilotadas por control remoto cuya masa máxima al despegue sea inferior a 2 kg, siempre que cuenten con medios para poder conocer la posición de la aeronave. La realización de los vuelos estará condicionada a la emisión de un NOTAM por el proveedor de servicios de información aeronáutica, a solicitud del operador debidamente habilitado, para informar de la operación al resto de los usuarios del espacio aéreo de la zona en que ésta vaya a tener lugar.

b) Las aeronaves civiles pilotadas por control remoto cuya masa máxima al despegue no exceda de 25 kg, sólo podrán operar en zonas fuera de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre, en espacio aéreo no controlado, dentro del alcance visual del piloto, a una distancia de éste no mayor de 500 m y a una altura sobre el terreno no mayor de 400 pies (120 m).

c) Las aeronaves civiles pilotadas por control remoto cuya masa máxima al despegue exceda de 25 kg y no sea superior a 150 kg y aquéllas cuya masa máxima de despegue sea igual o superior a 150 kg destinadas a la realización de actividades de lucha contra incendios o búsqueda y salvamento, sólo podrán operar, con las condiciones y limitaciones establecidas en su certificado de aeronavegabilidad emitido por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, en espacio aéreo no controlado.

d) Además, las operaciones previstas en las letras precedentes requerirán:

1.º Que el operador disponga de la documentación relativa a la caracterización de las aeronaves que vaya a utilizar, incluyendo la definición de su configuración, características y prestaciones.

2.º Que se disponga de un Manual de operaciones del operador que establezca los procedimientos de la operación.

3.º Que haya realizado un estudio aeronáutico de seguridad de la operación u operaciones, en el que se constate que la misma puede realizarse con seguridad. Este estudio, que podrá ser genérico o específico para un área geográfica o tipo de operación determinado, tendrá en cuenta las características básicas de la aeronave o aeronaves a utilizar y sus equipos y sistemas.

4.º Que se hayan realizado, con resultado satisfactorio, los vuelos de prueba que resulten necesarios para demostrar que la operación pretendida puede realizarse con seguridad.

5.º Que se haya establecido un programa de mantenimiento de la aeronave, ajustado a las recomendaciones del fabricante.

6.º Que la aeronave esté pilotada por control remoto por pilotos que cumplan los requisitos establecidos en esta disposición.

7.º Se exigirá a los operadores de las aeronaves civiles pilotadas por control remoto, una póliza de seguro u otra garantía financiera que cubra la responsabilidad civil frente a terceros por daños que puedan surgir durante y por causa de la ejecución del vuelo, según los límites de cobertura que se establecen en el Real Decreto 37/2001, de 19 de enero, por el que se actualiza la cuantía de las indemnizaciones por daños previstas en la Ley 48/1960, de 21 de julio, de Navegación Aérea, para las aeronaves de peso inferior a 20 kilogramos de peso máximo al despegue. Así mismo, para aquellas aeronaves cuyo peso sea superior a 20 kilogramos de peso máximo al despegue será aplicable el límite de cobertura establecido en el Reglamento (CE) n.º 785/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de abril de 2004, sobre los requisitos de seguro de las compañías aéreas y operadores aéreos.



8.º Que se hayan adoptado las medidas adecuadas para proteger a la aeronave de actos de interferencia ilícita durante las operaciones, incluyendo la interferencia deliberada del enlace de radio y establecido los procedimientos necesarios para evitar el acceso de personal no autorizado a la estación de control y a la ubicación de almacenamiento de la aeronave.

9.º Que se hayan adoptado las medidas adicionales necesarias para garantizar la seguridad de la operación y para la protección de las personas y bienes subyacentes.

10.º Que la operación se realice a una distancia mínima de 8 km respecto de cualquier aeropuerto o aeródromo o, para el caso de vuelos encuadrados en el apartado 3, letra a), si la infraestructura cuenta con procedimientos de vuelo instrumental, a una distancia mínima de 15 km de su punto de referencia. En otro caso y para los supuestos contemplados en este número, que se hayan establecido los oportunos mecanismos de coordinación con dichos aeródromos o aeropuertos. La coordinación realizada deberá documentarse, estando obligado el operador a conservarla a disposición de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea.

4. Asimismo, podrán realizarse los siguientes tipos de vuelos por aeronaves civiles pilotadas por control remoto, de día y en condiciones meteorológicas visuales, en espacio aéreo no controlado, dentro del alcance visual del piloto, o, en otro caso, en una zona del espacio aéreo segregada al efecto y siempre en zonas fuera de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre:

a) Vuelos de prueba de producción y de mantenimiento, realizados por fabricantes u organizaciones dedicadas al mantenimiento.

b) Vuelos de demostración no abiertos al público, dirigidos a grupos cerrados de asistentes a un determinado evento o de clientes potenciales de un fabricante u operador.

c) Vuelos para programas de investigación, nacionales o europeos, en los que se trate de demostrar la viabilidad de realizar determinada actividad con aeronaves civiles pilotadas por control remoto.

d) Vuelos de desarrollo en los que se trate de poner a punto las técnicas y procedimientos para realizar una determinada actividad con aeronaves civiles pilotadas por control remoto previos a la puesta en producción de esa actividad.

e) Vuelos de I+D realizados por fabricantes para el desarrollo de nuevos productos.

f) Vuelos de prueba necesarios para demostrar que las actividades solicitadas conforme al apartado 3 pueden realizarse con seguridad.

La realización de estos vuelos requerirá además, el cumplimiento de los requisitos establecidos en el apartado 3, letra d), números 1.º, 3.º, 6.º, 7.º, 8.º, 9.º y 10.º y, además, establecer una zona de seguridad en relación con la zona de realización del vuelo.

En los casos en que la operación se vaya a realizar por un operador no sujeto a la supervisión de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, deberá disponer de la autorización de la autoridad aeronáutica del país de origen para la realización de la actividad de que se trate y acreditar ante la Agencia Estatal de Seguridad Aérea que los requisitos de aquella autoridad son al menos equivalentes a los establecidos en este apartado.

5. Los pilotos deberán acreditar los siguientes requisitos:

a) Ser titulares de cualquier licencia de piloto, incluyendo la licencia de piloto de ultraligero, emitida conforme a la normativa vigente, o haberlo sido en los últimos cinco años y no haber sido desposeídos de la misma en virtud de un procedimiento sancionador, o

b) demostrar de forma fehaciente que disponen de los conocimientos teóricos necesarios para la obtención de cualquier licencia de piloto, incluyendo la licencia de piloto de ultraligero, o

c) para las aeronaves de masa máxima al despegue no superior a 25 kg, disponer:

1.º Para volar dentro del alcance visual del piloto, de un certificado básico para el pilotaje de aeronaves civiles pilotadas por control remoto, emitido por una organización

de formación aprobada, conforme al anexo VII del Reglamento (UE) n.º 1178/2011 de la Comisión, de 3 de noviembre de 2011, por el que se establecen requisitos técnicos y procedimientos administrativos relacionados con el personal de vuelo de la aviación civil, que acredite que dispone de los conocimientos teóricos adecuados en las materias de: normativa aeronáutica, conocimiento general de las aeronaves (genérico y específico), performance de la aeronave, meteorología, navegación e interpretación de mapas, procedimientos operacionales, comunicaciones y factores humanos para aeronaves civiles pilotadas por control remoto.

2.º Para volar más allá del alcance visual del piloto, de certificado avanzado para el pilotaje de aeronaves civiles pilotadas por control remoto, emitido por una organización de formación aprobada, conforme al anexo VII del Reglamento (UE) n.º 1178/2011 de la Comisión, que acredite además de los conocimientos teóricos señalados en el número 1.º, conocimientos de servicios de tránsito aéreo y comunicaciones avanzadas.

d) Además, en los supuestos previstos en las letras b) y c), deberán acreditar:

1.º Tener 18 años de edad cumplidos.

2.º Los pilotos que operen aeronaves de hasta 25 kilos de masa máxima al despegue deberán ser titulares, como mínimo, de un certificado médico que se ajuste a lo previsto en el apartado MED.B.095 del anexo IV, Parte MED, del Reglamento (UE) número 1178/2011 de la Comisión, de 3 de noviembre de 2011, por el que se establecen requisitos técnicos y procedimientos administrativos relacionados con el personal de vuelo de la aviación civil en virtud del Reglamento (CE) n.º 216/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, en relación a los certificados médicos para la licencia de piloto de aeronave ligera (LAPL).

3.º Los pilotos que operen aeronaves de una masa máxima al despegue superior a 25 kilos deberán ser titulares como mínimo de un certificado médico de Clase 2, que se ajuste a los requisitos establecidos por la sección 2, de la subparte B, del anexo IV, Parte MED, del Reglamento (UE) n.º 1178/2011 de la Comisión, emitido por un centro médico aeronáutico o un médico examinador aéreo autorizado.

e) Además, en todos los casos, deberán disponer de un documento que acredite que disponen de los conocimientos adecuados de la aeronave y sus sistemas, así como de su pilotaje, emitido bien por el operador, bien por el fabricante de la aeronave o una organización autorizada por éste, o bien por una organización de formación aprobada. En ningún caso dicho documento podrá haber sido emitido por el piloto para el que solicita la autorización.

6. El ejercicio de las actividades previstas en los apartados 3 y 4 por aeronaves cuya masa máxima al despegue sea igual o inferior a 25 kg, estará sujeta a la comunicación a la Agencia Estatal de Seguridad Aérea con una antelación mínima de cinco días al día del inicio de la operación. La comunicación previa deberá contener:

a) Los datos identificativos del operador, de las aeronaves que vayan a utilizarse en la operación y de los pilotos que la realicen, así como las condiciones en que cada uno de ellos acredita los requisitos exigibles conforme al apartado 5.

b) La descripción de la caracterización de dichas aeronaves, incluyendo la definición de su configuración, características y prestaciones.

c) El tipo de trabajos técnicos o científicos que se vayan a desarrollar o, en otro caso, los vuelos que se vayan a realizar y sus perfiles, así como de las características de la operación.

d) Las condiciones o limitaciones que se van a aplicar a la operación o vuelo para garantizar la seguridad.

Junto a la comunicación previa, el operador deberá presentar una declaración responsable en el que manifieste, bajo su responsabilidad, que cumple con cada uno de los requisitos exigibles conforme a lo previsto en este artículo para la realización de las



actividades u operaciones comunicadas, que dispone de la documentación que así lo acredita y que mantendrá el cumplimiento de dichos requisitos en el período de tiempo inherente a la realización de la actividad. Además de esta declaración responsable el operador deberá presentar el Manual de operaciones, el estudio aeronáutico de seguridad y la documentación acreditativa de tener suscrito el seguro obligatorio exigidos, respectivamente, por el apartado 3, letra d), números 2.º, 3.º y 7.º, y apartado 4. Cuando la comunicación previa se refiera a las operaciones previstas en el apartado 3, deberá presentarse junto a esta documentación el programa de mantenimiento y acreditación de la realización de los vuelos de prueba con resultado satisfactorio a que se refieren los números 4.º y 5.º de la letra d) de dicho apartado.

Cualquier modificación de la comunicación deberá ser comunicada a la Agencia Estatal de Seguridad Aérea con una antelación mínima de 5 días al día de la implementación de la modificación, presentando actualizada la declaración responsable y, en su caso, la documentación acreditativa complementaria prevista en este apartado.

La Agencia Estatal de Seguridad Aérea está obligada a emitir un acuse de recibo en el plazo de cinco días a contar desde el día de recepción de la documentación en el que, como mínimo, figuren las actividades para cuyo ejercicio queda habilitado por la comunicación o su modificación.

7. El ejercicio de las actividades previstas en los apartados 3 y 4 por aeronaves cuya masa máxima al despegue exceda de 25 kg así como cualquier modificación en las condiciones de ejercicio de dichas actividades o de los requisitos acreditados, estará sujeta a la previa autorización de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, conforme a lo previsto en este apartado.

La solicitud de autorización y sus modificaciones tendrá el contenido mínimo previsto para la comunicación previa en el apartado anterior y junto a ella deberá presentarse la declaración responsable y documentación complementaria exigida en dicho apartado.

8. La comunicación previa o autorización de la realización de los trabajos técnicos o científicos previstos en el apartado 3, y sus modificaciones habilita para el ejercicio de la actividad por tiempo indefinido, en el caso de las operaciones sujetas a comunicación previa una vez transcurrido el plazo de cinco días a que se refiere el apartado 6, con sujeción, en todo caso, al cumplimiento de los requisitos exigidos y en tanto se mantenga su cumplimiento.

La comunicación previa o autorización de la realización de los vuelos previstos en el apartado 4, y sus modificaciones habilita exclusivamente para la realización de aquellos vuelos que, según sea el caso, se hayan autorizado o comunicado con la antelación prevista en el apartado 6 y con sujeción, en todo caso, al cumplimiento de los requisitos exigidos y en tanto se mantenga su cumplimiento.

Los operadores habilitados conforme a lo previsto en este artículo para el ejercicio de las actividades aéreas a que se refiere el apartado 3, podrán realizar, bajo su responsabilidad, vuelos que no se ajusten a las condiciones y limitaciones previstas en los apartados 3 y 4 en situaciones de grave riesgo, catástrofe o calamidad pública, así como para la protección y socorro de personas y bienes en los casos en que dichas situaciones se produzcan, cuando les sea requerido por las autoridades responsables de la gestión de dichas situaciones.

9. Reglamentariamente se establecerá el régimen jurídico a que queda sujeta la operación e aeronaves civiles pilotadas por control remoto, en otros supuestos distintos de los contemplados en esta Ley.

10. Por resolución del Director de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea se podrán establecer los medios aceptables de cumplimiento cuya observancia acredita el cumplimiento de los requisitos establecidos en este artículo.

Sección 7.ª Otras reformas en materia de navegación y seguridad aérea

Artículo 51. *Modificación de la Ley 48/1960, de 21 de julio, sobre Navegación Aérea.*

La Ley 48/1960, de 21 de julio, sobre Navegación Aérea, queda modificada de la siguiente manera:

Uno. El artículo once queda redactado como sigue:

«Artículo once.

Se entiende por aeronave:

- a) Toda construcción apta para el transporte de personas o cosas capaz de moverse en la atmósfera merced a las reacciones del aire, sea o no más ligera que éste y tenga o no órganos motopropulsores.
- b) Cualquier máquina pilotada por control remoto que pueda sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones del mismo contra la superficie de la tierra.»

Dos. El artículo ciento cincuenta queda redactado de la siguiente manera:

«Artículo ciento cincuenta.

1. Las aeronaves de transporte privado de Empresas, las de Escuelas de Aviación, las dedicadas a trabajos técnicos o científicos y las de turismo y las deportivas, quedarán sujetas a las disposiciones de esta Ley, en cuanto les sean aplicables, con las excepciones que a continuación se expresan:

Primera. No podrán realizar ningún servicio público de transporte aéreo de personas o de cosas, con o sin remuneración.

Segunda. Podrán utilizar terrenos diferentes de los aeródromos oficialmente abiertos al tráfico, previa autorización de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea.

2. Las aeronaves civiles pilotadas por control remoto, cualesquiera que sean las finalidades a las que se destinen excepto las que sean utilizadas exclusivamente con fines recreativos o deportivos, quedarán sujetas asimismo a lo establecido en esta Ley y en sus normas de desarrollo, en cuanto les sean aplicables. Estas aeronaves no estarán obligadas a utilizar infraestructuras aeroportuarias autorizadas, salvo en los supuestos en los que así se determine expresamente en su normativa específica.»

Tres. El párrafo primero del artículo ciento cincuenta y uno queda redactado como sigue:

«Las actividades aéreas que se realicen a los fines del artículo anterior, excepto las de turismo y las deportivas, requerirán la comunicación previa a la Agencia Estatal de Seguridad Aérea o su autorización, a efectos de mantener la seguridad en las operaciones aeronáuticas y de terceros, en los casos en que la naturaleza de estas operaciones, el entorno o circunstancias en que se realizan supongan riesgos especiales para cualquiera de ellos, y estarán sometidas a su inspección en los términos establecidos por la legislación vigente.»

Cuatro. Se adiciona una nueva disposición transitoria tercera del siguiente tenor:

«Disposición transitoria tercera. *Régimen transitorio en materia de autorizaciones.*

En tanto no sea de aplicación la normativa específica que regule la comunicación previa prevista en el artículo ciento cincuenta y uno, será exigible la



previa autorización de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea para el ejercicio de las actividades previstas en dicho precepto.»

Artículo 52. *Modificación de la Ley 13/1996, de 30 de diciembre, de medidas fiscales administrativas y del orden social.*

El artículo 166 de la Ley 13/1996, de 30 de diciembre, de Medidas Fiscales, Administrativas y del Orden Social, queda redactado como sigue:

«Artículo 166.

1. Para garantizar las necesidades del tránsito y transporte aéreo y, en relación con los aeropuertos de interés general, el cumplimiento de los fines de interés general establecidos en el artículo 21 de la Ley 18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, así como las necesidades de gestión del espacio aéreo y los servicios de navegación aérea, el Ministerio de Fomento delimitará para los aeropuertos de interés general una zona de servicio que incluirá las superficies necesarias para la ejecución de las actividades aeroportuarias, las destinadas a las tareas complementarias de ésta y los espacios de reserva que garanticen la posibilidad de desarrollo y crecimiento del conjunto y aprobará el correspondiente Plan Director de la misma en el que se incluirán, además de las actividades contempladas en el artículo 39 de la Ley 48/1960, de 21 de julio, sobre Navegación Aérea, los usos industriales y comerciales cuya localización en ella resulte necesaria o conveniente por su relación con el tráfico aéreo o por los servicios que presten a los usuarios del mismo.

En la tramitación de los Planes Directores se recabará el informe de la correspondiente Comunidad Autónoma y de otras administraciones públicas afectadas, en relación con sus respectivas competencias, en particular en materia urbanística y de ordenación del territorio, en los términos previstos reglamentariamente.

2. Los planes generales y demás instrumentos generales de ordenación urbana calificarán los aeropuertos y su zona de servicio como sistema general aeroportuario y no podrán incluir determinaciones que supongan interferencia o perturbación en el ejercicio de las competencias de explotación aeroportuaria.

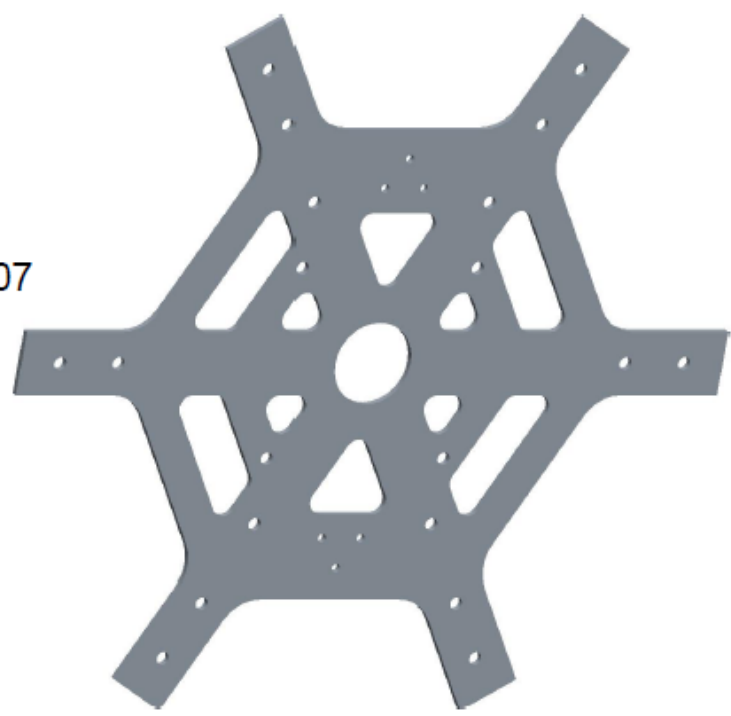
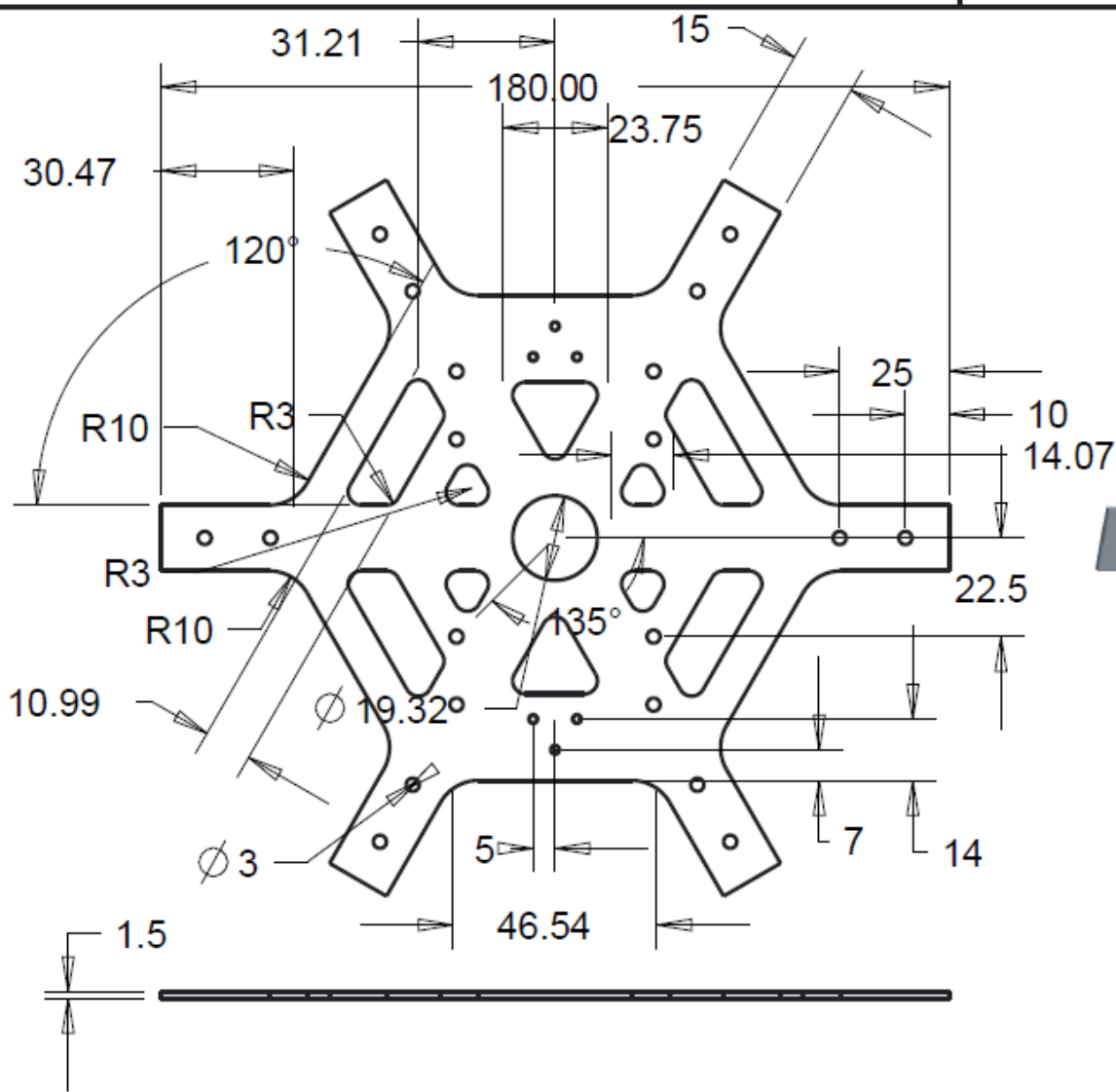
Dicho sistema general aeroportuario se desarrollará a través de un plan especial o instrumento equivalente, que se formulará por el gestor, de acuerdo con las previsiones contenidas en el correspondiente Plan Director y se tramitará y aprobará de conformidad con lo establecido en la legislación urbanística aplicable.

La autoridad urbanística competente para la aprobación del Plan Especial dará traslado al gestor del acuerdo de aprobación provisional del mismo para que éste se pronuncie en el plazo de un mes sobre los aspectos de su competencia, en caso de desacuerdo entre ambos se abrirá un período de consultas por un plazo de seis meses y si, al término del mismo, no se hubiere logrado un acuerdo expreso entre ellas sobre el contenido del Plan Especial, se remitirá el expediente al Consejo de Ministros al que corresponderá informar con carácter vinculante.

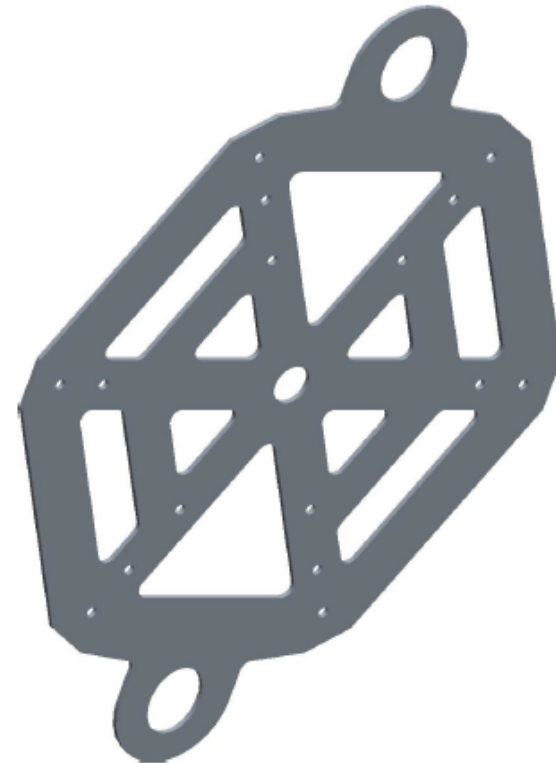
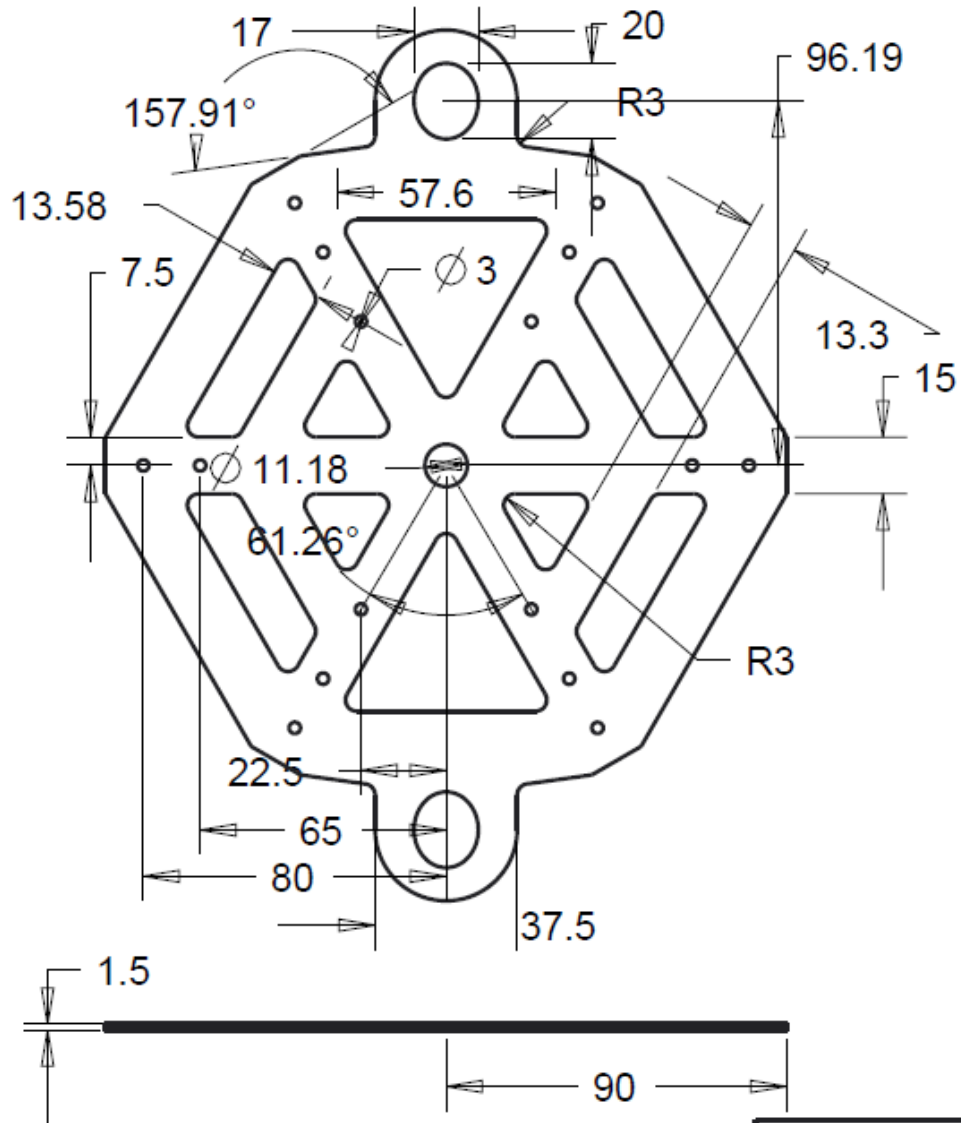
3. Las obras que realice el gestor dentro del sistema general aeroportuario deberán adaptarse al plan especial de ordenación del espacio aeroportuario o instrumento equivalente. Para la constatación de este requisito, deberán someterse a informe de la administración urbanística competente, que se entenderá emitido en sentido favorable si no se hubiera evacuado de forma expresa en el plazo de un mes desde la recepción de la documentación. En el caso de que no se haya aprobado el plan especial o instrumento equivalente, a que se refiere el apartado 2 de este artículo, las obras que realice el gestor en el ámbito aeroportuario deberán ser conformes con el Plan Director del Aeropuerto.

Las obras de nueva construcción, reparación y conservación que se realicen en el ámbito del aeropuerto y su zona de servicio por el gestor no estarán sometidas a

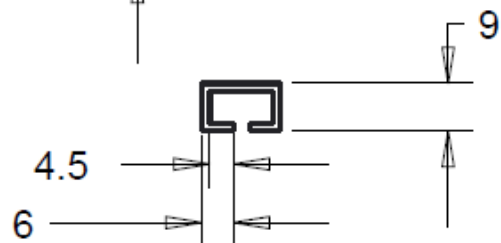
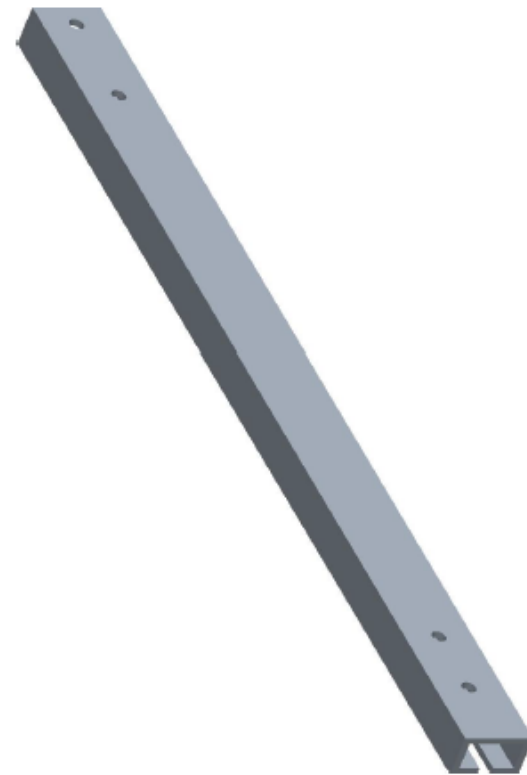
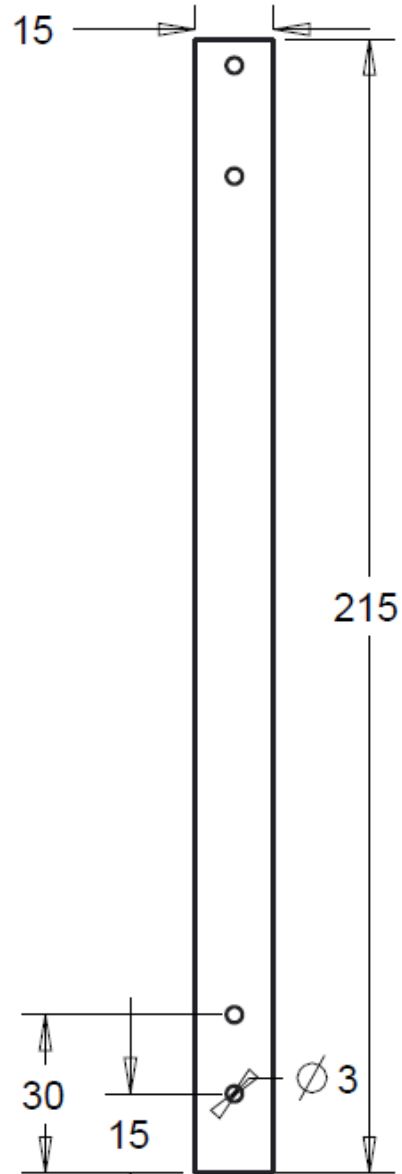
## **ANNEX 2: Plànols de l'estructura**



Dissenyat per:	Universitat de Vic		
Gil Prat Pladevall	Placa principal		
Data: 7/7/2016	A4	Plànol nº0	Unitats: mm
Escala: 0.6			

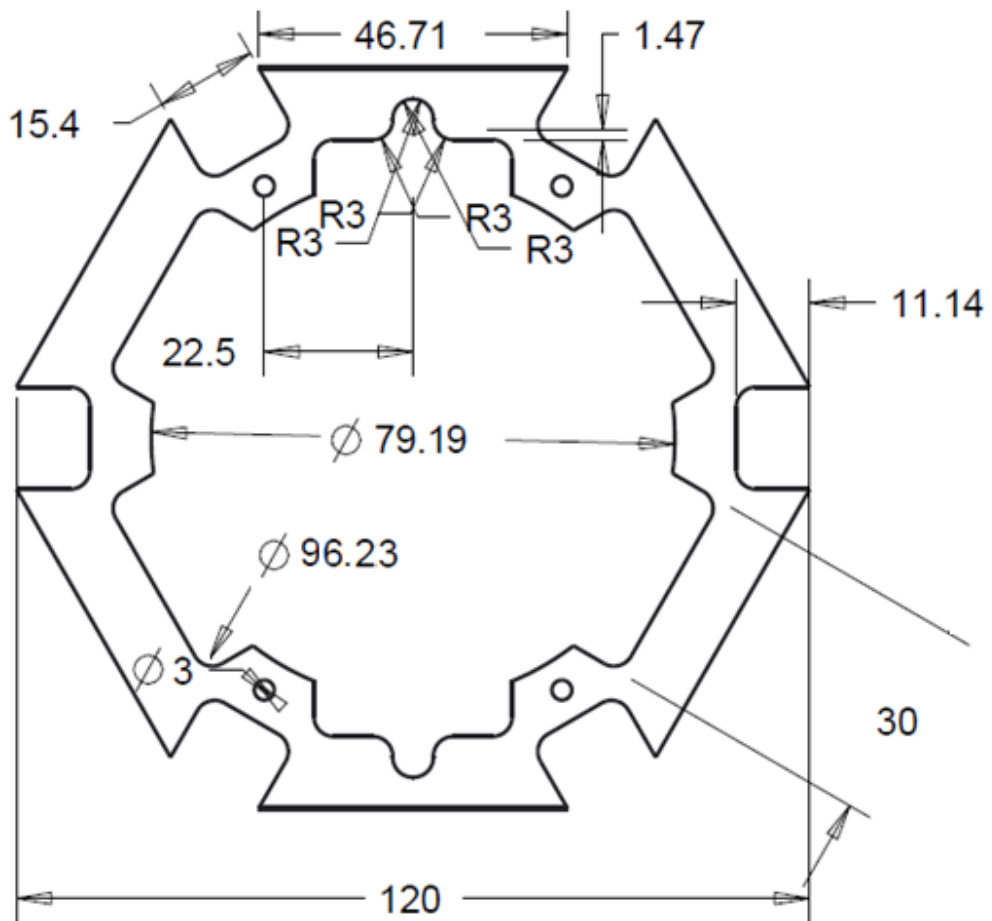


Dissenyat per:	Universitat de Vic		
Gil Prat Pladevall	Placa subjecció bateria		
Data: 7/7/2016	A4	Plànol nº 1	Unitats: mm
Escala: 0.5			

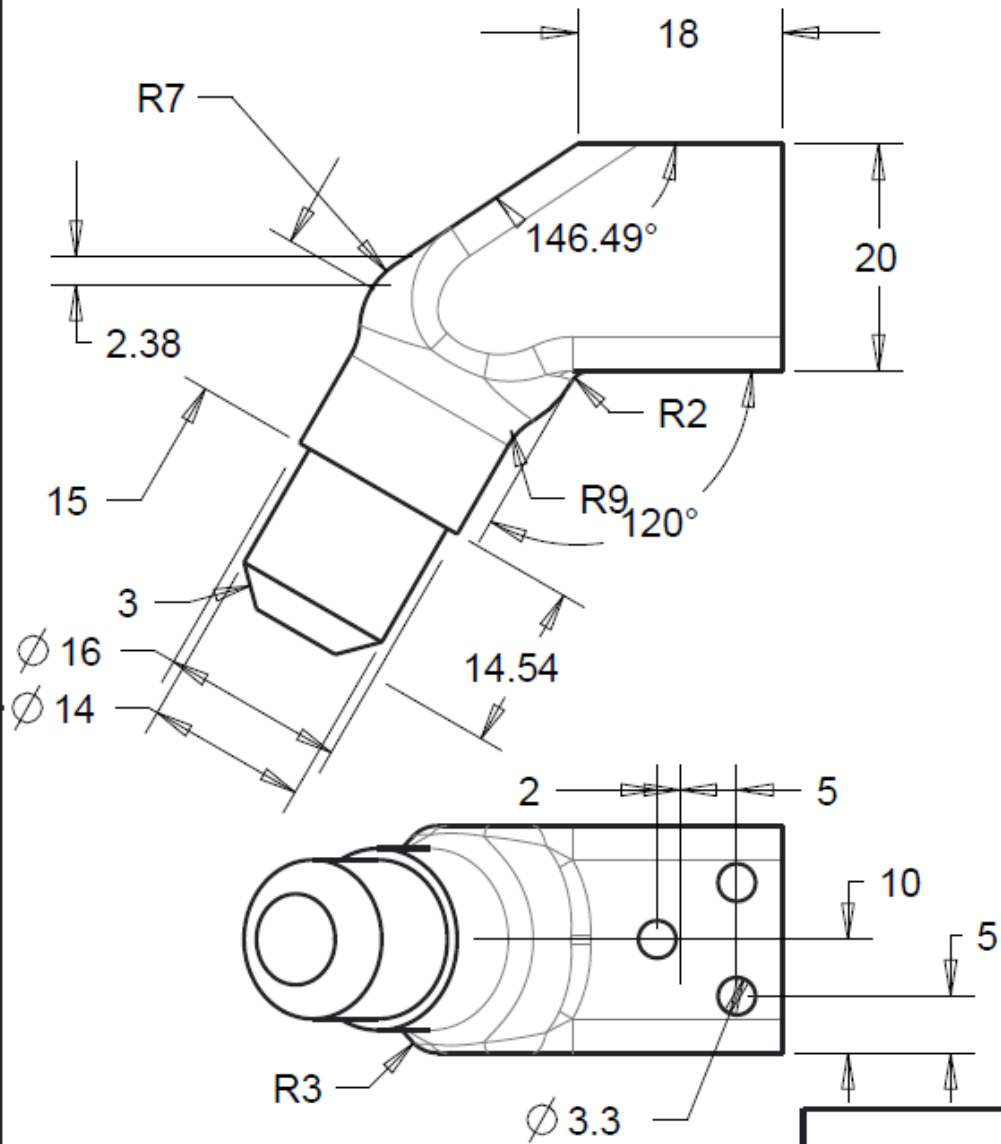


Dissenyat per:	Universitat de Vic		
Gil Prat Pladevall	Braç		
Data: 7/7/2016	A4	Plànol nº2	Unitats: mm
Escala: 0.7			

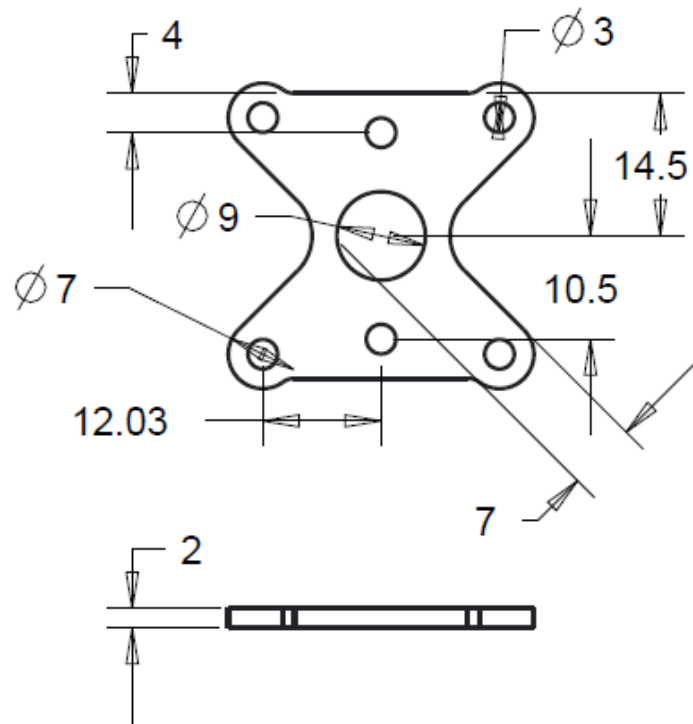




Dissenyat per:	Universitat de Vic		
Gil Prat Pladevall	Placa guia		
Data: 7/7/2016	A4	Plànol nº3	Unitats: mm
Escala: 0.9			

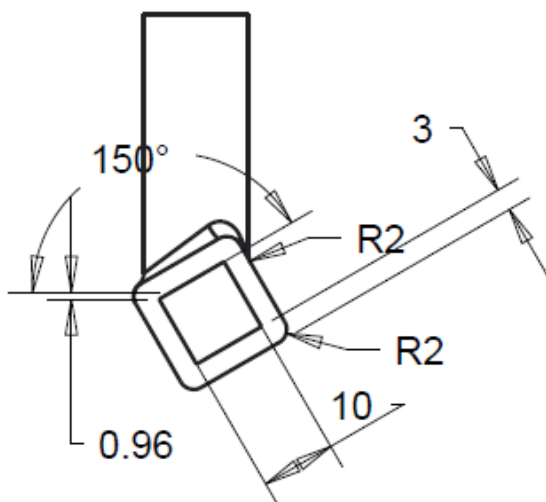
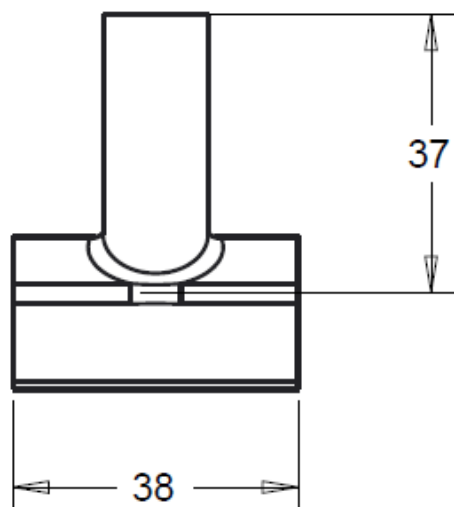
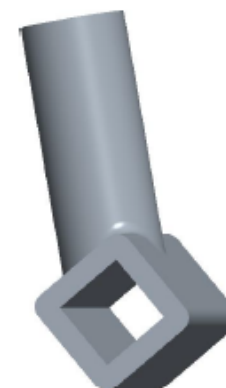
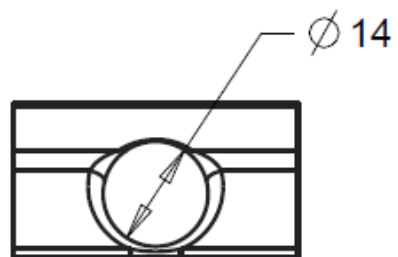


Dissenyat per: Gil Prat Pladevall	Universitat de Vic		
	Junta barra cilíndrica - placa principal		
Data: 7/7/2016	A4	Plànol nº 4	Unitats: mm
Escala: 1.5			

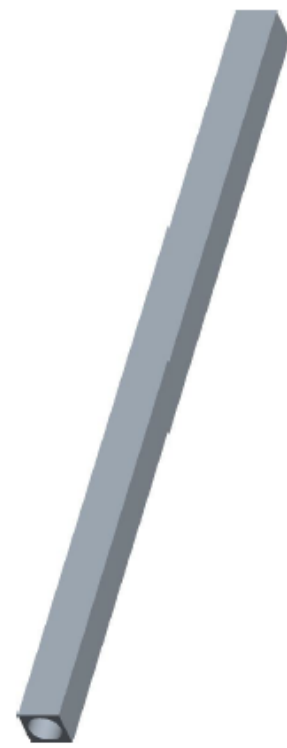
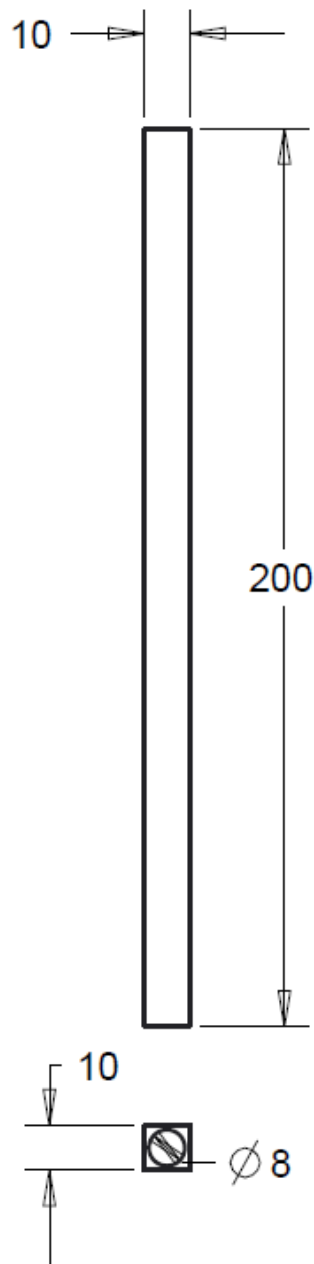


ESCALA 2.000

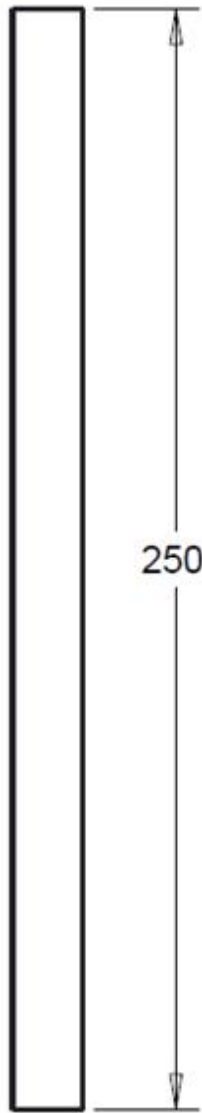
Dissenyat per:	Universitat de Vic		
Gil Prat Pladevall	Suport motor		
Data: 7/ 7/2016	A4	Plànol nº 5	Unitats: mm
Escala: 1.3			



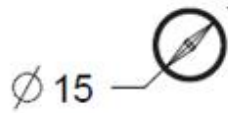
Dissenyat per:	Universitat de Vic		
Gil Prat Pladevall	Junta peu-barra cilíndrica		
Data: 7/7/2016	A4	Plànol nº6	Unitats: mm
Escala: 1			



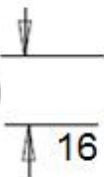
Dissenyat per: Gil Prat Pladevall	Universitat de Vic		
	Barra quadrada		
Data: 7/7/2016	A4	Plànol nº 7	Unitats: mm
Escala: 0.6			



250



Ø 15



16



Dissenyat per:	Universitat de Vic		
Gil Prat Pladevall	Barra rodona		
Data: 7/7/2016	A4	Plànol nº8	Unitats: mm
Escala: 0.6			

## ANNEX 3: Càlcul de la potència requerida pels motors

### **Vol estacionari:**

Com s'ha explicat a l'apartat 2.5, la potència requerida per els motors en estat estacionari es pot calcular:

$$P_i = T v_i$$

si tenim en compte que el pes de l'estructura és de 3kg, i establim una càrrega adicional, el pes total serà de 6kg., per tant 60 newtons de força repartits en 6 motors, és a dir 10N per motor. Per tant  $T=10N$ .

per trobar  $v_i$  s'ha utilitzat la formula:

$$v_{io} = \sqrt{\frac{T}{2 \cdot \rho \cdot A}}$$

$$v_{io} = \sqrt{\frac{10}{2 \cdot 1.05 \cdot A}} = \mathbf{10.773}$$

sabent que la densitat a l'altura de 1000m és de 1.05, i l'àrea de el disc que forma la nostra hélix és de  $(\pi \cdot 0.1143)^2$ .

Per tant la potencia necessària en vol estacionari és de  $10 \cdot 10.773 = \mathbf{107.7W}$ .

### **En pujada:**

Com hem vist anteriorment, sabem que la potencia necessària en pujada té la fórmula següent:

$$P_i = T (v_c + v_i)$$

On en aquest cas s'estableix  $V_c$  com a 6m/s, i  $v_i$  en funció de  $v_{io}$  que es calcula de la manera següent:

$$\frac{v_i}{v_{io}} = -\frac{1}{2} \frac{v_c}{v_{io}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{v_c}{v_{io}}\right)^2 + 1}$$

$$\frac{v_i}{v_{io}} = -\frac{1}{2} \frac{6}{10.77} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{6}{10.77}\right)^2 + 1}$$

$$\frac{v_i}{v_{io}} = 0.759$$

$$v_i = 0.759 \cdot v_{io} = 8.18$$

$$P_i = 10 (6 + 8.18) = \mathbf{141.8 W}$$



Aquest resultat anterior el dividim per 0.7 per així poder compensar l'error de la teoria aplicada ja que no és del tot exacte i d'aquesta manera s'estalvien riscos

$$P_{req} = \frac{P_i}{0.7} = 202.57W.$$

Finalment, com que no es vol que els motors funcionin al màxim durant el vol, es multiplica per un coeficient de seguretat de 1.5. d'aquesta manera els motors no funcionaran al màxim, i aniran més refrigerats.


$$P_{req} = 202.57 \cdot 1.5 = 303.85W.$$


## **ANNEX 4: Manual d'usuari**


Per el correcte funcionament del multicòpter, abans d'iniciar el vol s'han de seguir els passos següents:


### **Preparar l'equip per el vol**


- Encendre emissor.
- Situar el multicòpter en un lloc pla i estable.
- Connectar la bateria.
- Un cop connectada la bateria, observar la seqüència de LED de la placa controladora.


 Parpelleig vermell i blau: Inicialitzant. Esperar


 Doble parpelleig groc: Error. El sistema no s'armarà


 Parpelleig blau: Desarmat, buscant GPS.

 Parpelleig verd: Desarmat, GPS trobat.


 Estàtic verd. Armat i apunt per volar.


 Parpelleig groc: Mode d'error de radiocontrol activat.


 Parpelleig groc ràpid: Mode d'error de bateria baixa activat.

 Parpelleig blau i groc, amb avís acústic: Mode d'error de GPS activat.

- Pulsar l'interruptor de seguretat per armar el multicòpter tenint en compte que l'emissor estigui amb el gas avall. La seqüència d'aquest interruptor es la següent.

 Parpelleig constant i ràpid,: comprovació del sistema.

 Parpelleig inermitent: Sistema apunt. Pulsar el pulsador de seguretat per armar.

 Estàtic vermell. Drone preparat per volar.

- Comprovar mode de vol desitjat.
- Si es desitja volar amb les ulleres FPV, connectar la bateria de les ulleres FPV, el receptor d'aquestes trobarà el senyal automàticament de l'emissor FPV.
- Desarmar l'emissor mantenint el gas al màxim avall i el màxim a l'esquerra durant 3 segons. Per realitzar aquesta acció, cal allunyar-se abans a una distància de seguretat mínima de 5 metres, ja que els motors es posaran en funcionament.
- Un cop acabat el vol i el multicòpter ha aterrat, tornar-lo a armar, mantenint el gas de l'emissor el màxim avall i a la dreta. També si aquest ja no es tornarà a utilitzar armar el multicòpter polsant el switch de seguretat.
- Per últim desconnectar la bateria.

## Sistema de control

Per emissor:

S'observa en la imatge els controls del joystick. En vermell el gas, en blau moviment de capcineig, en verd el balanceig, i en taronja el moviment de guinyada.



Per moure el gimbal es faran servir dos rodets, una per cada eix del gimbal. Aquestes son les següents:



## Canviar modes de vol

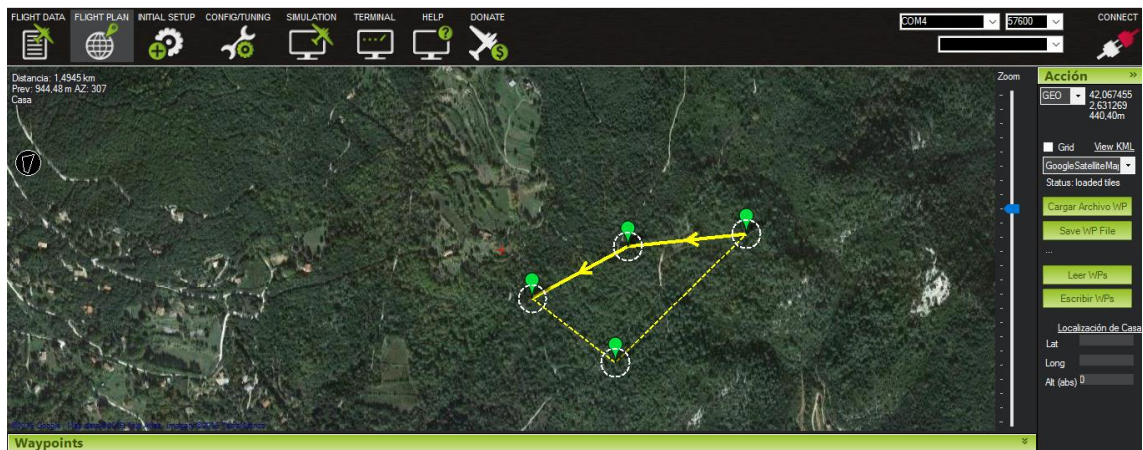
Per a canviar el mode de vol, com es veu a l'imatge s'ha de moure el switch indicat. Si aquest està a baix, aquest funcionarà en mode loiter (ajude per GPS). Si aquest switch està cap a dalt, el multicòpter funcionarà en mode estabilitzat, o automàtic dependent del que hagi demanat l'usuari.



Configurar mode de vol automàtic:

Un cop el multicòpter s'ha posat en mode automàtic, se li ha de marcar les coordenades GPS desde l'aplicació mission planner. Per fer això s'ha de connectar el transmissor de radiofreqüència al port usb de l'ordinador. Un cop fet això obrir l'aplicació mission planner i establir comunicació amb l'equip.

Un cop fet això, anar a la pantalla plans de vol, premer el botó dret i inserir els punts que l'usuari li interressi, i col·locar-los en les coordenades que ha de passar l'equip. Un cop acabat això clicar sobre el botó escriure punts. La velocitat i l'altura de vol estan autodeterminades i l'usuari no les podrà modificar.



En aquest punt el pla de vol ja esta configurat. Perquè el vehicle comenci el vol, s'ha de moure el gas de l'emissor i el multicòpter començarà la missió.

Durant el pilot automàtic els controls de l'emissor estaran tots desactivats excepte el moviment de guinyada. Tot i això en tot moment l'usuari pot canviar el mode de vol si li interessa. La missió de vol es podrà seguir amb la mateixa pantalla amb la qual s'ha configurat el pla de vol.

### **Consells de seguretat:**

- Abans de cada vol assegurar que les hèlix estan ben collades.
- Comprovar el nivell de la bateria en cada vol.
- Comprovar nivell de bateria de l'emissor.
- No connectar la bateria sense posar anteriorment la càmera al gimbal.
- No volar mai dos drones amb la mateixa freqüència sense una gran distància de seguretat, ja que es farien interferències.
- No volar mai amb pluja.
- Fer manteniment de motors i de la placa de control sovint.
- No intentar canviar paràmetres de configuració si no es té el coneixement necessari sobre l'equip.
- Si s'utilitza l'equip en una finalitat que no sigui de gravació d'imatge, com podria ser per fer acrobàcies, no s'assegura un correcta funcionament d'aquest.

## ANNEX 5: Ficha tècnica alumini6060

# -6060- (ALUMINIO – MAGNESIO – SILICIO)

## COMPOSICIÓN QUÍMICA

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	Al
Mínimo	0,30	0,10			0,35				Total	
Máximo	0,60	0,30	0,10	0,10	0,60	0,05	0,15	0,20	0,15	El resto

## PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS ( a temperatura ambiente de 20°C )

Estado	Características a la tracción					
	Carga de rotura Rm. N/mm <sup>2</sup>	Límite elástico Rp 0,2, N/mm <sup>2</sup>	Alargamiento A 5,65%	Límite a la fatiga N/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la cizalladura $\tau$ N/mm <sup>2</sup>	Dureza Brinell (HB)
0	100	50	27	110	70	25
T1	150	90	25		95	45
T4	160	90	20		105	50
T5	220	185	13	160	140	75
T6	245	215	13	160	150	85

## PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS ( a temperatura ambiente de 20°C )

Módulo elástico N/mm <sup>2</sup>	Peso específico g/cm <sup>3</sup>	Intervalo de fusión °C	Coefficiente de dilatación lineal 1/10 <sup>6</sup> K	Conductividad térmica W/m K	Resistividad eléctrica a 20°C - $\mu\Omega$ cm	Conductividad eléctrica % IACS	Potencial de disolución V
69,500	2,70	610-655	23,4	T1-195 T5-209	T1-3,5 T5-3,2	T1-49,5 T5-54	-0,8

## APTITUDES TECNOLÓGICAS

### SOLDADURA

A la llama	
Al arco bajo gas argón	
Por resistencia eléctrica	
Braseado	

### MECANIZACIÓN

	Estado: T5	Estado: T6
Fracmentación de la viruta		
Brillo de superficie		

### COMPORTAMIENTO NATURAL

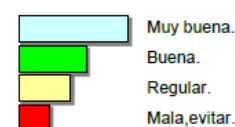
En ambiente rural	
En ambiente industrial	
En ambiente marino	
En agua de mar	

### RECUBRIMIENTO

Lacado	
Galvanizado	
Níquel químico	

### ANODIZADO

De protección	
Decorativo	
Anodizado duro	



# -6060- (ALUMINIO – MAGNESIO – SILICIO)

## CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN A DIFERENTES TEMPERATURAS

Estado	-195°C			-80°C			-30°C			+25°C			+100°C		
	Rm	Rp 0,2	A 5,65	Rm	Rp 0,2	A 5,65	Rm	Rp 0,2	A 5,65	Rm	Rp 0,2	A 5,65	Rm	Rp 0,2	A 5,65
T1	235	110	44	180	105	36	165	95	34	150	90	33	150	95	20
T5	255	165	28	250	150	24	195	150	23	185	145	22	165	140	18
T6	325	250	24	260	230	20	250	220	19	240	215	16	215	195	15

Estado	+150°C			+205°C			+260°C			+315°C			+370°C		
	Rm	Rp 0,2	A 5,65	Rm	Rp 0,2	A 5,65	Rm	Rp 0,2	A 5,65	Rm	Rp 0,2	A 5,65	Rm	Rp 0,2	A 5,65
T1	145	105	20	60	45	40	31	24	75	22	17	80	16	14	105
T5	140	125	20	60	45	40	31	24	75	22	17	80	16	14	105
T6	145	140	20	60	45	40	31	24	75	22	17	80	16	14	105

Rm N/mm<sup>2</sup> ; Rp N/mm<sup>2</sup> ; A 5,65 %

Según normas A.A.

## TRATAMIENTOS DEL ALUMINIO

Estado	Tratamiento de puesta en solución T°C	Medio de temple	Tratamientos de maduración artificial. Mantenimiento a T° en horas	Maduración natural.
T4	530°C ± 5 °C	Aire forzado		8 días mínimo
T5	530°C ± 5 °C	Aire forzado	8 horas a 175 ± 5°C ó 6 horas a 185 ± 5°C	
	505°C ± 5 °C	Agua fría máx. a 40°C	8 horas a 175 ± 5°C ó 6 horas a 185 ± 5°C	

Intervalo de temperatura de forja: 400° – 480°C

Recocido total: 420°C, con enfriamiento lento hasta 250°C

Recocido contra acritud: 340°C

1 kg / mm<sup>2</sup> = 9,81 N/mm<sup>2</sup>; 1N/mm<sup>2</sup> = 1MPa

## APLICACIONES

Perfiles para arquitectura, puertas, ventanas, muros cortina, mobiliario, estructuras, escaleras, peldaños, barandillas, verjas enrejadas, barreras, cercados, disipadores de calor, módulos electrónicos, carcasas para motores eléctricos, sistemas de ensamblado, remaches, elementos especiales para maquinaria, carrocerías de camión, instalaciones neumáticas, tubos de riego, calefacción y refrigeración.

## OBSERVACIONES

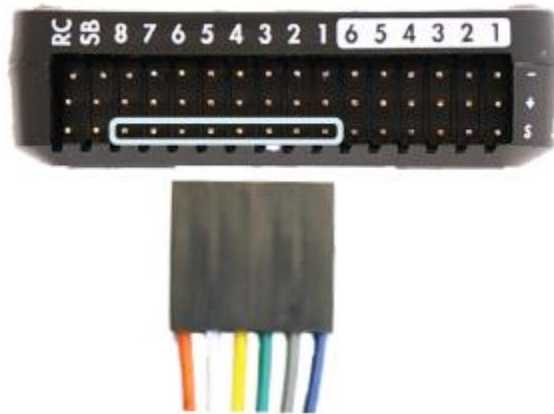
Aleación de buena conformabilidad especialmente en los estados T1 y T4, es muy utilizada para extruir perfiles con secciones complicadas, aleación tratable con características medias y con resistencia inferior a la 6005 A,



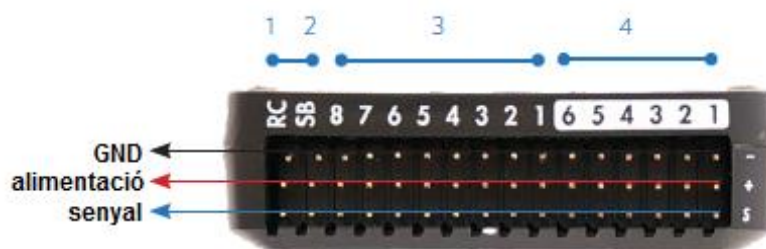
## ANNEX 6: Electrònica

### 6.1 Connexió ESC.

Connexió Sortides ESC



Pin 1 = Motor 1	Pin 5 = Motor 5
Pin 2 = Motor 2	Pin 6 = Motor 6
Pin 3 = Motor 3	Pin 7 = Motor 7
Pin 4 = Motor 4	Pin 8 = Motor 8



1. Entrada receptor RC
2. Sortida S.Bus
3. Sortides principals
4. Sortides auxiliars

## **6.2 Normativa freqüències ISM**

# Normatividad para las Frecuencias ISM Orientada hacia Aplicaciones de Dispositivos Xbee-802.15.4-Pro\*

## ISM Frequency Regulations for Xbee-802.15.4-Pro Device Applications

Artículo de Investigación Científica - Fecha de Recepción: 28 de febrero de 2014 - Fecha de Aceptación: 1° de octubre de 2014

Gustavo Emilio Echeverry Vásquez

Especialista en Gerencia Integral de la Telecomunicaciones. Especialista en Interventoría de Proyectos de Telecomunicaciones. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá (Colombia), gustavo.echeverry@unimilitar.edu.co

Yaciro Cabezas Burbano

Especialista en Interventoría de Proyectos de Telecomunicaciones. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá (Colombia), yaciro.cabezas@unimilitar.edu.co

Nancy Esperanza Olarte López

Especialista en Tecnologías de la Información Aplicadas a la Educación. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá (Colombia), nancy.olarte@unimilitar.edu.co

Para citar este artículo / To reference this article:

G. Echeverry, Y. Cabezas and N. Olarte, "Normatividad para las Frecuencias ISM Orientada hacia Aplicaciones de Dispositivos Xbee-802.15.4-Pro," *INGE CUC*, vol. 10, no. 2, pp. 81–90, 2014.

**Resumen:** Los dispositivos de comunicación inalámbricos existentes pueden llegar a generar pérdidas en la información transmitida, inherentes al tratamiento de los datos a transmitir. La tecnología WLAN (Red de Área Local Inalámbrica) está ligada a las restricciones propias de los dispositivos, teniendo en cuenta parámetros como: ancho de banda, potencia de radiación y el alcance de los mismos. Es por esto que en la actualidad se ha avanzado en el desarrollo de sistemas que permiten trabajar con mayor velocidad y procesamiento de información, facilitando así la interacción con el usuario. Los resultados mostrados en este artículo demuestran que es posible transmitir señales de tipo biomédico, sean electrocardiográficas (ECG), respiración o presión sanguínea (BP), de forma inalámbrica bajo una frecuencia de 2,4GHz, lo anterior sujeto también a la regulación existente en Colombia, que conoceremos en este documento, y que permite realizar actividades de tipo industrial, científica y médica (ISM).

**Palabras clave:** ISM, WLAN, LRWPAN, DSSS, potencia de radiación, ancho de banda, velocidad de transmisión.

**Abstract:** Existing wireless communication devices today may generate loss of conveyed information, inherent to the data processing to be transmitted. WLAN technology (Wireless Local Area Network) is linked to devices' specific restrictions and takes into account other parameters such as: bandwidth, radiation power, and range. For this reason, a great progress in developing systems to work faster and process information efficiently has been made, thus, becoming more user-friendly. The results shown in this article demonstrate that it is possible to transmit biomedical signals such as electrocardiograph (ECG), respiration, and blood pressure (BP) activities, among others, through a 2,4GHz-frequency wireless network. Nevertheless, the abovementioned situation is subject to existing regulations in Colombia regarding industrial, scientific, and medical activities (ISM), which will also be expounded.

**Keywords:** ISM, WLAN, LRWPAN, DSSS, Radiation power, Bandwidth, Transmission speed.

\* Artículo de Investigación Científica derivado del proyecto de investigación titulado "Diseño e implementación de un centro de experimentación para la transmisión y recepción de datos biomédicos -", Fecha de Inicio: Enero de 2013 -Fecha de Finalización: Enero de 2014.

Tabla I. BANDAS DE FRECUENCIA PARA REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL (WLAN)

FRECUENCIA INICIAL	FRECUENCIA FINAL
902 MHz	928 MHz
2400 MHz	2483,5MHz
5150 MHz	5250 MHz
5250 MHz	5350 MHz
5470 MHz	5725 MHz
5725 MHz	5850 MHz

Fuente: [10].

Como se observa, el rango de frecuencias para el tema de interés está entre los 2400 y 2483,5. Por otro lado, en la misma resolución también se nombran los sistemas de acceso inalámbrico WAS (*Wireless Access Systems*) y las redes inalámbricas de área local RLAN (*Radio Local Area Network*), las cuales operan en las bandas que se pueden apreciar en la Tabla II:

Tabla II. BANDAS DE FRECUENCIA PARA REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL (RLAN)

Frecuencia Inicial	Frecuencia final
5150 MHz	5250 MHz
5250 MHz	5350 MHz

Fuente: [10].

Cabe destacar que la misma reglamentación impide que se propague cualquier tipo de señal en el espectro para estas frecuencias con potencias que oscilan entre 125 mW y 1 W.

Así mismo, es de suma importancia tener en cuenta que los siguientes valores de parámetros establecidos por el Ministerio de Comunicaciones (Tabla III), para el uso de la banda de 2,4 GHz, [10]

Para hacer un breve análisis, acerca de hasta qué valor debería ser la ganancia de la antena (dBi), de manera particular para la frecuencia 2,4GHz, configurando un módulo transmisor en potencia máxima, el anterior cuadro se interpretaría de la siguiente forma: "La potencia máxima de transmisión para un enlace es de 1 Watt (30 dBm) y la PIRE máxima es de 36 dBm. Para enlaces punto a punto, si la ganancia de la antena es mayo a 6 dBi, se

Tabla III. USO DE LA BANDA 2,4 GHZ SEGÚN MINISTERIO DE COMUNICACIONES

Banda (GHz)	Potencia Máxima de Transmisión (dBm)	PIRE máxima (dBm)	Potencia Máxima de Transmisión (dBm) G>	Potencia Máxima de Transmisión (dBm) G> 6dBi
2,4 - 2,835	30	36	30-[(G-6)/3]	30-(G-6)

Fuente: [14].

disminuye la potencia del transmisor en 1 dBm por cada 3 dBi que sobrepase la ganancia de la antena a 6 dBi. Si el enlace es bajo la configuración punto-multipunto y si la ganancia de la antena es mayor a 6 dBi, se disminuye la potencia del transmisor en 1 dBm por cada dBi que sobrepase la ganancia de la antena a 6 dBi" [14].

Paralelamente, mediante la Resolución 797 de 2001 [15] se atribuyeron las frecuencias y bandas radioeléctricas para uso libre por parte del público en general, en aplicaciones de telemetría, telemando, telealarmas, telecontrol vehicular, dispositivos de operación momentánea de voz y datos (*walkie talkie*), que contengan niveles de potencia bajos o intensidad de campo, según las características manifiestas en dicha resolución. En la Tabla IV se muestran los diferentes niveles de potencia a los cuales se puede radiar según la frecuencia utilizada.

Tabla IV. TABLA DE FRECUENCIAS PARA DISPOSITIVOS DE OPERACIÓN MOMENTÁNEA

BANDAS DE FRECUENCIAS (MHZ)	LÍMITE DE POTENCIA O DE INTENSIDAD DE CAMPO (a 3 metros)
40,66 a 40,70	10 mV/m
70 a 108	1250 uV/m (470 nW)
138 a 149,9	1250 a 3750 µV/m
150,5 a 156,5	1250 a 3750 µV/m
156,9 a 174	1250 a 3750 µV/m
174 a 260	3750 a 12500 µV/m
260 a 328,6	3750 a 12500 µV/m
335,4 399,9	3750 a 12500 µV/m
406 a 470	3750 a 12500 µV/m
470 a 960	12500 uV/m (47 µW)
Mayor a 1427	12500 uV/m (47 µW)

Fuente: [15].

Análogicamente, por medio de esta misma resolución también se dan a conocer las frecuencias sus correspondientes bandas, las cuales podrán ser utilizadas por el público en general y acorde con la aplicación se les asigna la frecuencia y el nivel de potencia de operación, tal como se muestra en la Tabla V.

### **6.3 Control PID a l'UAV**



# Different Approaches of PID Control UAV Type Quadrotor

G. Szafranski, R. Czyba

Silesian University of Technology, Akademicka St 16, Gliwice, Poland

## ABSTRACT

In this paper we focus on the different control strategies for the unmanned aerial vehicles (UAV). The control task is formulated as an angular stabilization of the quadrotor platform, and also as a tracking problem of chosen state variables. The PID algorithm has been considered in three structures in respect of the optimal control signal applied to the actuators. For better performance of quadrotor during the hover mode the cascade control system has been proposed.

The experiment results for the platform orientation control with different PID controller architectures are presented, and confirm the effectiveness of the proposed method and theoretical expectations.

## 1 INTRODUCTION

Unmanned aerial platforms are not a new invention. They were first introduced during the World War I, but not until recently have been flown autonomously. Among the several kinds of mini and micro unmanned aerial vehicles (MUAVs), quadrotors are probably the most common. This platform can occur in one of two configurations, "plus" or "cross" shape, and has been widely developed by many Universities such as MIT or Stanford/Berkeley, and commercial companies Draganflyer, X3D-BL, Xaircraft [6]. The great maneuverability and possible small size of this platform make it suitable for indoor use, as well as for outdoor applications. Such aerial platform has several application domains [4], [7]: safety, natural risk management, environmental protection, management of the large infrastructures, agriculture and film production. This aerial vehicle is highly maneuverable, has the potential to hover and to take-off, fly, and land in small areas, and has a simple control mechanism. However, a quadrotor is unstable and impossible to fly in full open loop system. The dynamics of a flying vehicle is more complex than the ground robots, so that even the hovering becomes a non-trivial task. Thus, control of a nonlinear plant is a problem of both practical and theoretical interest.

Improved performance expected from the new generation of VTOL vehicles is possible through derivation and implementation of specific control techniques incorporating limitations related to sensors and actuators. The well-known approach to decoupling problem solution based on the Non-linear Inverse Dynamics (NID) method may be used if the parameters of the plant model and external disturbances are exactly known. Usually, incomplete information about systems in real practical tasks take place. In this case adaptive control methods or control systems with sliding mode [3], [4] may be used for solving such control problem.

A way of the algorithmic solution of this problem under condition of incomplete information about varying parameters of the plant and unknown external disturbances is the application of the Dynamic Contraction Method (DCM) [14] applied in [10]. But the most problems of those approaches in real applications are: high order of the controller equations and influence of measurement noise for a control quality. Approximations of higher derivatives amplify the measurement noise and cause abrupt changes of control signal. Therefore in this paper the different structures of PID controllers, which can reduced the adverse effects are considered.

The main aim of this research effort is to examine the effectiveness of a designed attitude control system for the quadrotor in the cascade control system with different types of PID controllers [2],[5].

The paper is organized as follows. First, a mathematical description of the quadrotor nonlinear model is introduced. The next part presents a general structure of a cascade control system, and investigation of three types of PID controllers with modified loop structure. This section includes the schemes and description of PID controller type A, B, C. The next chapter shows the results of simulations in two sections: first – inner loop control with all types PID controllers; second – performed in the cascade control system. Finally, the conclusions are briefly discussed in the last chapter.

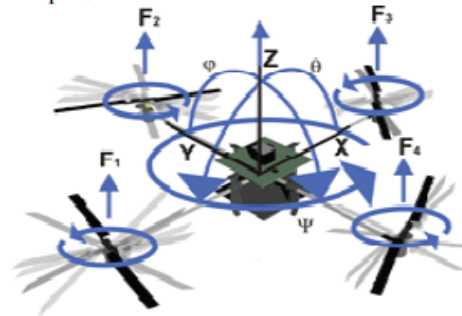


Figure 1: Quad-thrust aerial vehicle.

## 2 QUADROTOR MODEL

Described below the quadrotor model based on the self-modified version of a commercial Draganflyer platform. The aerial vehicle consists of a rigid cross frame equipped with four rotors as shown in Fig. 1.

The two pairs of propellers (1,3) and (2,4) turn in opposite directions. By varying the rotor speed, one can change the lift force and create motion. Thus, increasing or decreasing the four propeller's speeds together generates vertical motion. Changing the 2 and 4 propeller's speed conversely produces roll rotation coupled with lateral motion. Pitch rotation and the longitudinal motion result

Email address: [grzegorz.szafranski@polsl.pl](mailto:grzegorz.szafranski@polsl.pl), [roman.czyba@polsl.pl](mailto:roman.czyba@polsl.pl).

from 1 and 3 propeller's speed conversely modified. Yaw rotation – as a result from the difference in the counter-torque between each pair of propellers [8].

### 2.1 Rigid Body Model

The quadrotor is a six degrees of freedom system defined with twelve states. The following state and control vectors are adopted:

$$(1) \quad X = [\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}, x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}]^T$$

$$(2) \quad U = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T$$

where:  $u_i$  - control input of motor,  
 $i = 1, 2, 3, 4$  - motor number.

Six out of twelve states govern the attitude of the system (Fig.2). These include the Euler angles ( $\phi, \theta, \psi$ ) and angular rates around the three orthogonal body axes. The other six states determine the position ( $x, y, z$ ) and linear velocities of the center of mass of the quadrotor with respect to a fixed reference frame.

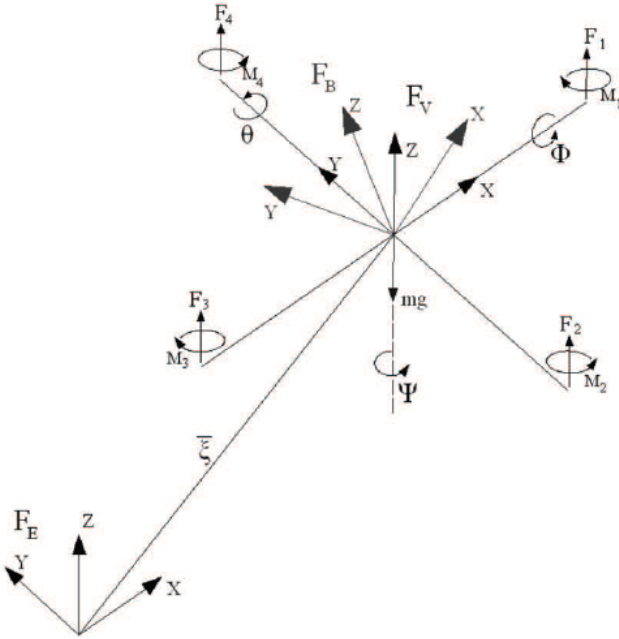


Figure 2: Quad-thrust aerial vehicle.

Using the Lagrangian, and the general form of the equations of motion in Lagrange method [1], [8], [12], [13]:

$$(3) \quad L = T_K - V$$

$$(4) \quad F = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q}$$

where:  $L$  is Lagrangian,  $T_K$  is kinetic energy,  $V$  is potential energy,  $q = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$  is a vector of generalized coordinates,  $F = (F_E, T)$  are a generalized forces  $F_E$  and moments  $T$  applied to the quadrotor due to the control inputs.

For translational motion the Lagrange equation has a form:

$$(5) \quad F_E = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \xi}$$

where:  $\xi = [x, y, z]^T$  - position coordinates,

$$F_E = \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ -\sin(\phi) \cos(\theta) \\ \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot f_g$$

$$f_g = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$

$$F_i = b \Omega_i^2$$

$\Omega_i$  - rotor speed

$b$  - thrust factor

Accordingly, the Lagrange equation for rotary motion is following:

$$(6) \quad T = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \eta}$$

where:

$\eta = [\phi, \theta, \psi]^T$  - Euler angles

$$T = [T_\phi \quad T_\theta \quad T_\psi]^T$$

$$T_\phi = bl(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) - J_r \dot{\theta}(\Omega_1 + \Omega_3 - \Omega_2 - \Omega_4)$$

$$T_\theta = bl(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) + J_r \dot{\phi}(\Omega_1 + \Omega_3 - \Omega_2 - \Omega_4)$$

$$T_\psi = d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2)$$

$l$  - distance between propeller center and CoG

$J_r$  - rotor inertia

$d$  - drag factor

Above torques equations ( $T_\phi, T_\theta, T_\psi$ ) consist of the action of the thrust forces difference of each pair, and from the gyroscopic effect.

Finally the quadrotor dynamic model with  $x, y, z$ , motions as a consequence of a pitch, roll and yaw rotations is as follows:

$$(7) \quad \ddot{\theta} = \frac{1}{I_{xx}} \left( -\dot{\phi}^2 (I_{xx} - I_{zz}) s(\theta) c(\theta) - \dot{\phi} \dot{\psi} I_{zz} c(\theta) + T_\theta \right)$$

$$(8) \quad \ddot{\phi} = \frac{1}{I_{yy} (1 + s^2(\theta))} \left( -\dot{\psi} I_{zz} s(\theta) - \dot{\theta} \dot{\phi} c(\theta) s(\theta) \cdot (2I_{zz} - 2I_{yy}) - \dot{\theta} \dot{\psi} I_{zz} c(\theta) + T_\phi \right)$$

$$(9) \quad \ddot{\psi} = \frac{1}{I_{zz}} \left( -\dot{\phi} I_{zz} s(\theta) + T_\psi \right)$$

$$(10) \quad \ddot{x} = \frac{f_g}{m} s(\theta)$$

$$(11) \quad \ddot{y} = -\frac{f_g}{m} c(\theta) s(\phi)$$

$$(12) \quad \ddot{z} = \frac{f_g}{m} c(\theta) c(\phi) - g$$

where:

$s$  and  $c$  are abbreviations of 'sin' and 'cos',

$I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$  - inertia moments.



### 2.2 Propulsion system

The dynamics of the propulsion system consists of a DC motor and propeller. Motor model can be considered as a first order differential equation (13) because of a very low inductance.

$$(13) \quad J_r \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{k_m}{R} u - \frac{k_m k_e}{R} \omega_m - \tau_l$$

where:  $u$  - motor input,  $R$  - motor resistance,  $k_e$  - motor electrical constant,  $\omega_m$  - motor angular speed,  $J_r$  - rotor inertia,  $k_m$  - torque constant,  $\tau_l$  - motor load.

The torque produced by motor is converted by propeller to the thrust force [9], [11]. The relationship between the angular velocity and the thrust is given in the following form:

$$(14) \quad F_T = C_T \rho D^4 \cdot n_p^2$$

The thrust coefficient  $C_T$  is a propeller parameter and it primarily depends on the  $\lambda$  ratio given as:

$$(15) \quad \lambda = \frac{V}{n_p D}$$

where:  $V$  - air speed,  $n_p$  - propeller velocity in revolutions per second,  $D$  - propeller diameter,  $\rho$  is the air density.

Finally we obtain propulsion system modeled as a series connection of a linear first order dynamic element and static nonlinear second degree polynomial (Fig. 3).

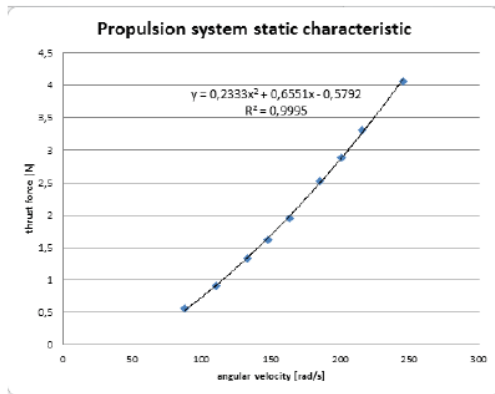


Figure 3: Static characteristic of propulsion system.

## 3 CONTROL SCHEME

In control applications, the rejection of external disturbances and performance improvement is a major concern. In order to fulfill such requirements, the implementation of a cascade control system can be considered. Basically, in a cascade control schema the plant has one input and two or more outputs [2]. Indeed, this requires an additional sensor to be employed so that the fast dynamics could be measured.

The primary controller and the primary dynamics are components of the outer loop. The inner loop is also a part of the outer loop, since the primary controller calculates the set point for the secondary controller loop. Furthermore the inner loop represents the fast dynamics, whereas the outer

should be significantly slower (with respect to the inner loop). This assumption allows to restrain interaction that can occur between them and improve stability characteristics. Therefore a higher gain in the inner loop can be adopted. An additional advantage is, that the plant nonlinearities are handled by the controller in the inner loop and they do not have meaningful influence on the outer loop [5].

In this paper the cascade control structure is proposed, as a solution to control task formulated as an angular stabilization. The angular velocities of the rotating platform are additional measurements that can be used in the inner loop. In this case, there is no need to assemble any extra sensors, thus the AHRS (Attitude and Heading Reference Signal) provides not only angles but also other raw data, such as accelerations, angular velocities and gravitational field strength. The outer loop is based on the Euler angles, the measurements are calculated from the combination of the accelerometers, gyroscopes and magnetometer. The cascade control loop for the quadrotor vehicle is shown in Fig. 4.

### 3.1 Inner and Outer PID controllers

In both loops three types of PID controllers are considered.

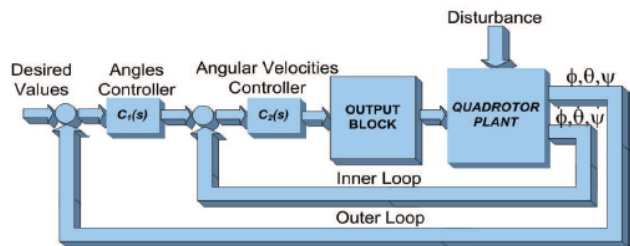


Figure 4: Cascade control system for quadrotor.

### 3.2 PID Controller – type A

In control theory the ideal PID controller in parallel structure is represented in the continuous time domain as follows:

$$(16) \quad u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

where:  $K_p$  - proportional gain,

$K_i$  - integral gain,

$K_d$  - derivative gain.

A block diagram that illustrates given controller structure is shown in the Fig. 5.

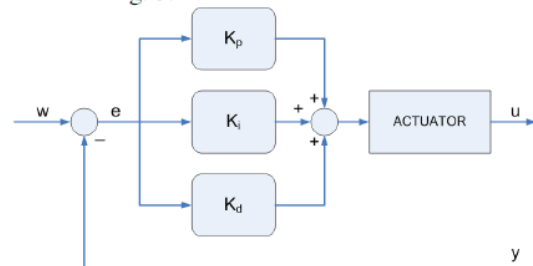


Figure 5: PID Controller – type A.

The problem with conventional PID controllers is their reaction to a step change in the input signal which produces an impulse function in the controller action. There are two sources of the violent controller reaction, the proportional term and derivative term. Therefore, there are two PID

controller structures that can avoid this issue. In literature exists different names [2], [5]: type B and type C; derivative-of-output controller and set-point-on-I-only controller; PI-D and I-PD controllers. The main idea of the modified structures is to move either the derivative part or both derivative and proportional part from the main path to the feedback path. Therefore, they are not directly subjected by jump of set value, while their influence on the control reaction is preserved, since the change in set point will be still transferred by the remaining terms.

3.3 PID Controller – type B

It is more suitable in practical implementation to use "derivative of output controller form". The equation of type B controller is following:

$$(17) \quad u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau - K_d \frac{dy(t)}{dt}$$

A block diagram that illustrates given controller structure is shown in Fig. 6.

If PI-D structure is used, discontinuity in  $r(t)$  will be still transferred through proportional into control signal, but it will not have so strong effect as if it was amplified by derivative element.

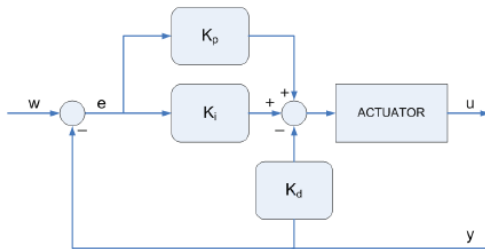


Figure 6: PID Controller – type B.

3.4 PID Controller – type C

This structure is not so often as PI-D structure, but it has certain advantages. Control law for this structure is given as:

$$(18) \quad u(t) = -K_p y(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau - K_d \frac{dy(t)}{dt}$$

Block diagram for type C controller is shown in Fig. 7.

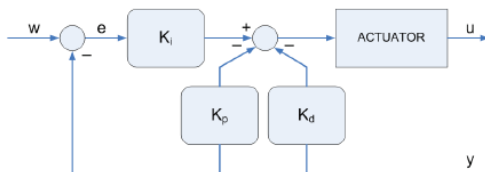


Figure 7: PID Controller – type C.

With this structure transfer of reference value discontinuities to control signal is completely avoided. Control signal has less sharp changes than with other structures.

4 SIMULATIONS RESULTS

In this section, we present the results of simulations which were conducted to evaluate the performance of the designed attitude control system in the cascade structure with different types of PID controllers. The presented simulations consisted in transition with predefined dynamics

from one steady-state flight to another. In the design we consider three types of PID controllers (type A, type B and type C) and optimize the parameters in view of the assumed reference model. To evaluate the quality of control it was taken into account the tracking of the reference model, and in particular the realizability of the control in practical aspects.

The entire MIMO control system consists of three control channels with two PID controllers each. Feedback data for the regulators are six variables: angles  $\phi, \theta, \psi$  (outer loop) and angular velocities  $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$  (inner loop). Control signals are motors inputs:  $u_1, u_2, u_3$ . The general control task is stated as a tracking problem with the following variables:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\phi_0(t) - \phi(t)] = 0$$

$$(19) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} [\theta_0(t) - \theta(t)] = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\psi_0(t) - \psi(t)] = 0$$

where  $\phi_0(t), \theta_0(t), \psi_0(t)$  are the desired values of considered variables.

In view of the complexity and multidimensionality of the considered problem only the results in  $\theta$  pitch channel are presented.

The tuning of the cascade controller parameters was made in two steps. First, inner loop controller was tuned based on the assumed reference model. The dynamics is determined by a following transfer function

$$(20) \quad K_{ref,1}(s) = \frac{1}{sT_i + 1}$$

where  $T_i = 0.25$  [s].

At this stage of designing we consider three structures of PID controller: type A, type B (PI-D), and type C (I-PD).

In this case the accuracy requirements for the system are formulated in a form of two performance indices related to the time responses of the system. Therefore, the first index introduced the following quadratic integral index tracking performance:

$$(21) \quad I_{tr} = \int_0^T [w(t) - y(t)]^2 dt$$

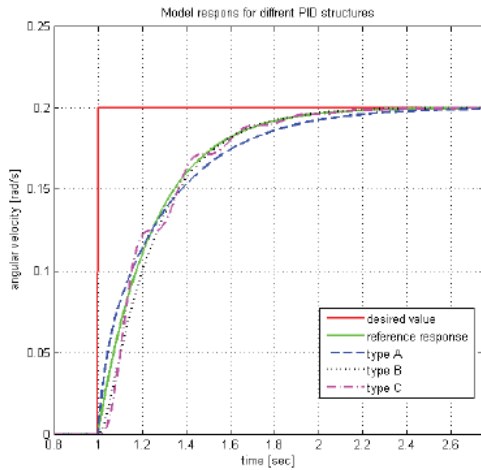
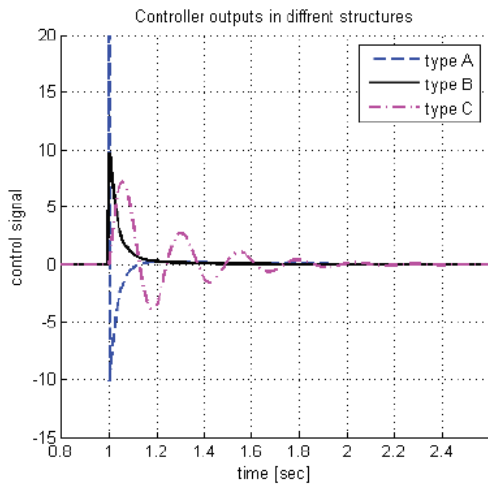
Second index determines the effort of control signal and is defined as follows:

$$(22) \quad I_u = \int_0^T u^2(t) dt$$

Numerical results are shown in Table 1.

Structure	Value
Control Index	
Type A	1399.365
Type B	1.8674
Type C	4.8704
Tracking Index	
Type A	0.90128
Type B	0.77048
Type C	1.0

Table1: Performance Indices.


 Figure 8: Time history of angular velocity  $\dot{\theta}$ .

 Figure 9: Time history of control signal  $u_{\theta}$ .

*Remark 1:* The relative order of the inner loop with PID controller is equal one.

*Remark 2:* Based on the remark 1 the reference model is provided by the first order inertia system (20).

*Remark 3:* Gradient descent method allows to tune the controller parameters, and obtain the satisfactory reference model tracking results in all structures (Table1).

*Remark 4:* However, the index of control signal effort in particular types of PID controllers indicates significant differences.

*Remark 5:* In the terms of practical implementation the type A seems to be not acceptable (value=2047). On the basis of the presented findings, the most common structure is type B, therefore this one will be used in the next step, as the best possible solution.

In the second step the outer loop controller was tuned based on the assumed following reference model:

$$(23) \quad K_{ref,o}(s) = \frac{1}{\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1}$$

where:  $\tau = 0.4$  - undamped resonance period,  
 $\xi = 1$  - relative damping factor.

*Remark 6:* In respect of the slower outer loop dynamics the reference model was determined as a second order differential equation (23).

*Remark 7:* Referring to remark no. 5, the advantages of

the type B PID controller has been confirmed in cascade control system.

*Remark 8:* In case of PI controller the architectures type A and B are equivalent.

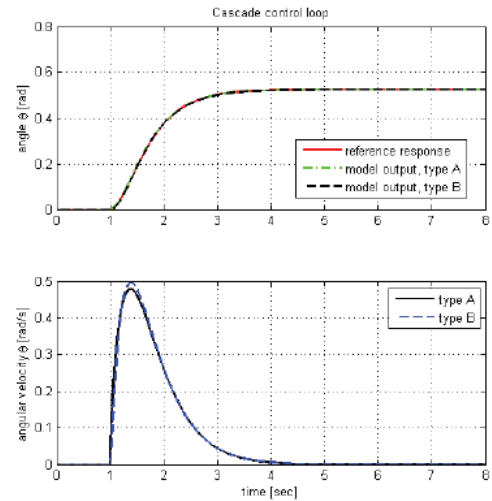


Figure 10: Time history of pitch angle and angular velocities.

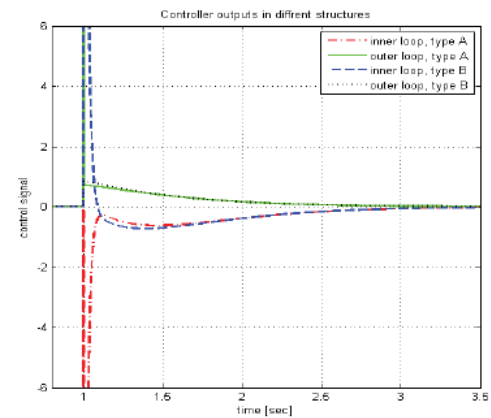


Figure 11: Controllers signals.

## 5 CONCLUSION

In this paper, the different approaches to the problem of attitude control of a quadrotor were considered. The main goal of this research is the evaluation of different types of PID algorithm in practical aspects of control systems design. Three architectures were presented and examined with respect to the best performance. All of the reviewed architectures of the controllers resulted in almost the same model output response time but significantly different control signals. Taking into consideration the proposed control effort index, type B architecture is the most comprehensive choice.

Assumed reference models provides time separation between fast and slow dynamics in the cascade system. The application of a cascade control structure gives the possibility to adapt the simple PID algorithm for controlling complex systems, such as vertical take-off and landing platform. Proposed approach is an alternative solution to the advanced control algorithms but it requires additional sensor, which provides measurement for the inner control loop. However, from the point of unmanned aerial vehicle,

### **6.3 Especificacions Pixhawk**



## RB-Trs-32 3DR PX4 Pixhawk Advanced Autopilot



Pixhawk is an advanced autopilot system designed by the PX4 open-hardware project and manufactured by 3D Robotics. It features advanced processor and sensor technology from ST Microelectronics® and a NuttX real-time operating system, delivering incredible performance, flexibility, and reliability for controlling any autonomous vehicle.

The benefits of the Pixhawk system include integrated multithreading, a Unix/Linux-like programming environment, completely new autopilot functions such as Lua scripting of missions and flight behavior, and a custom PX4 driver layer ensuring tight timing across all processes. These advanced capabilities ensure that there are no limitations to your autonomous vehicle. Pixhawk allows existing APM and PX4 operators to seamlessly transition to this system and lowers the barriers to entry for new users to participate in the exciting world of autonomous vehicles.

The flagship Pixhawk module will be accompanied by new peripheral options, including a digital airspeed sensor, support for an external multi-color LED indicator and an external magnetometer. All peripherals are automatically detected and configured.

### Features

- Advanced 32 bit ARM Cortex® M4 Processor running NuttX RTOS
- 14 PWM/servo outputs (8 with failsafe and manual override, 6 auxiliary, high-power compatible)
- Abundant connectivity options for additional peripherals (UART, I2C, CAN)
- Integrated backup system for in-flight recovery and manual override with dedicated processor and stand-alone power supply
- Backup system integrates mixing, providing consistent autopilot and manual override mixing modes
- Redundant power supply inputs and automatic failover
- External safety button for easy motor activation

- Multicolor LED indicator
- High-power, multi-tone piezo audio indicator
- microSD card for long-time high-rate logging

## **Specifications**

### **Microprocessor**

- 32 bit STM32F427 Cortex M4 core with FPU
- 168 MHz/256 KB RAM/2 MB Flash
- 32 bit STM32F103 failsafe co-processor

### **Sensors**

- ST Micro L3GD20H 16 bit gyroscope
- ST Micro LSM303D 14 bit accelerometer / magnetometer
- MEAS MS5611 barometer

### **Interfaces**

- 5x UART (serial ports), one high-power capable, 2x with HW flow control
- 2x CAN
- Spektrum DSM / DSM2 / DSM-X® Satellite compatible input
- Futaba S.BUS® compatible input and output
- PPM sum signal
- RSSI (PWM or voltage) input
- I2C®
- SPI
- 3.3 and 6.6V ADC inputs
- External microUSB port

### **Power System**

- Ideal diode controller with automatic failover
- Servo rail high-power (7 V) and high-current ready
- All peripheral outputs over-current protected, all inputs ESD protected

### **Weight and Dimensions**

- Weight: 38g (1.31oz)
- Width: 50mm (1.96")
- Thickness: 15.5mm (.613")
- Length: 81.5mm (3.21")

## 6.4 Taula especificacions motors.

### Turnigy - NTM - 2836 - Prop Drive Series

Model - 2836 	750kv	1000kv	1200kv	1400kv	1800kv	2200kv	2700kv
Poles	3	3	6	6	3	3	3
Motor Wind	20T	14T	12T	10T	9T	7T	6T
Max current	18A	30A	36A	45A	30A	50A	50A
Max Power -3S	165W	/	295W	470W		310W	520W
Max Power -4S	265W	400W	530W	560W	438W	696W	595W
Weight	87g	89g	85g	86g	84g	87g	87g
ESC	20A	30-40A	30-40A	45-55A	30-40A	40-60A	40-60A
Cell count	3s-4s Lipo	3s-6s Lipo*	3s-4s Lipo	3s-4s Lipo	3-4s Lipo	3s-4s Lipo	3s-4s Lipo
Prop Data 3S -11,1 Volt		11x7 - 220W / 20A 976g thrust	10x5 - 195W / 17.6A 1.02kg thr.	8x4 - 266W / 24A 1.02kg thrust	5x5 - 123W - 11.1A	5x5 - 232W 20.9A 0.64kg thr	4.75x4.75 - 311W / 28A / 0.7kg thr.
		12x6 - 215W 20A 1.08kg thr.	11x7 - 295W 26.5A 1.12kg thr		6x4 - 182W - 16.4A	6x4 - 310W / 28A / 0.945kg thrust	5x5 - 400W / 36A 0.85kg thrust
		13x4 - 223W / 20A 1.06kg thr.					
Prop Data 4S - 14,8 Volt		11x7E - 412W - 28A 1.485kg thr.	10x5 - 430W / 29A 1.5kg thrust	8x4 - 560W / 38A 1.48kg thrust	5x5 - 303W - 20.5A	5x5 - 516W 34.9A / 1.021kg	4.75x4.75 - 594W 40A / 1.12kg thr.
		12x6 - 430W / 29A 1.42kg thr.	11x7 - 530W / 36A 1.48kg thr.		6x4 - 438W - 29.6A	6x4 - 696W / 47.0A / 1.17kg	6x4 - 520W / 46.8A / 1.2kg thr.
		13x4 - 400W / 27A 1.48kg thr.					
Preis	16,01 €	15,71	15,63	16,01	16,44	16,51	16,53
Shaft 4mm	• Bolt holes - 16mm & 19mm		• Bolt thread - M3	• Connection - 3.5mm Bullet-connector			



# 6.5 Especificacions ESC.

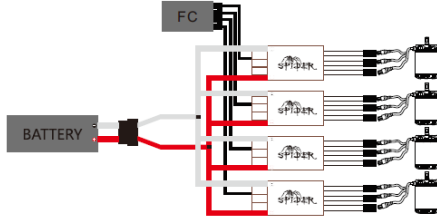


## Spider-Series Brushless ESC User Manual V2

Thank you for purchasing ZTW Spider Series Brushless Electronic Speed Controller (ESC). Spider series ESCs are especially designed to meeting the demand of ever popular multirotors. Spider ESCs carry the features and workmanship of our products has been. Most of all the stability of this series will keep your craft safe in the air. This product is no toy, please use it carefully. ZTW and its reseller are not responsible for your use of this product, or any damage or injuries you may cause or sustain as a result of its usage.

### Connecting your ESC:

- Connect your controller with motor wires.
- Solder appropriate connectors to the battery wires.
- Insulate all solder connectors with heat shrink tubes.
- Plug signal cable into throttle channel in the receiver.
- Red and Black wires from ESC should connect to battery pack Red and Black wires respectively.






### Features:

- Use new generation of the MOSFETs to make sure the ESC low heating and high reliability.
- Supports High RPM motors, can be matched with most of the motors in the RC market.
- Super smooth and accurate throttle linearity.
- Super fast Refresh Rate up to 600Hz.
- Extremely low internal resistance.

### Throttle Calibration

When you use the ESC for the first time, we would like to suggest you calibrate your throttle end point of your radio system. This will make the throttle response better. Please see following steps of how-to:

-  Power on your radio and push your throttle stick to 100%
-  Then connect battery to your ESC, you will hear two "beeps" from motor to confirm the end point after three seconds
-  Pull throttle stick back to 0%, you will hear two "beeps" from motor confirm the lowest end point.



4. Throttle calibration is done. Please recycle your battery to use the ESC.



### Enter Programming Mode

1. Power on your radio and push throttle stick to 100% position
2. Then connect battery to your ESC, you will hear two "beeps" from motor indicating that you are in the programming mode.
3. You will hear two different beep from the motor which indicate different menu. When you hear the beep you want you can pull throttle stick to 0% position. Note: 1 short beep means the you are in the "mode menu", two short beep means you are in the "motor timing" menu.
4. When you enter a specific menu, the motor will keep beeping till you choose a value by pushing the throttle stick to 100% position.
5. If you want to quit please disconnect the battery to save the setting. Or keep listening the beeps from the motor.

### Sound Indication Table

Menu	1 Short Beep	2 Short Beep	3 Short Beep	4 Short Beep	1 Long Beep	Long(1) + Short(1)
Mode	Model	Mode2				
Motor Timing	Auto	2°	8°	15°	22°	30°

NOTE: The item marked in gray is the default setting from factory. Mode 1 and Mode2 are designed to cater for different KV motors. If mode1 would not power your motor smoothly please change it to mode2. Normally mode1 would work in most circumstances.

### Specifications:

Type	PN#Model	Cont./Burst Current (A)	Max. Power W	Battery cell NiXX/Lipo	Weight (g)	BEC Output	Size (mm) W*L*H	User Program
Spider 20A OPTO	5020301	20A/30A	380	5-18NC /2-6Lipo	23	NONE	25*43*9	NO
Spider 30A OPTO	5030301	30A/40A	500	5-18NC /2-6Lipo	25	NONE	25*43*9	NO
Spider 30A OPTO Small	5030311	30A/40A	500	5-18NC /2-6Lipo	24	NONE	20*47*8	NO
Spider 40A OPTO	5040301	40A/50A	630	5-18NC /2-6Lipo	33	NONE	27*52*10	NO
Spider 50A OPTO	5050301	50A/60A	750	5-18NC /2-6Lipo	48	NONE	37*52*10	NO
Spider 60A OPTO	5060301	60A/70A	880	5-18NC /2-6Lipo	50	NONE	37*52*10	NO

## Shenzhen ZTW Model Science & Technology Co.,Ltd

www.ztwoem.com



ADD: 5/F B, Block A4, Anle Industrial Estate, st. Hangcheng, Gushu, Xixiang, BaoAn, Shenzhen, China, 518126  
 TEL: +86 755 29120026, 29120036, 29120056  
 FAX: +86 755 29120016 E-mail: sales@ztwoem.com support@ztwoem.com

## **6.6 Guia Telemetria.**



# 3DR RADIO V2

## QUICK START GUIDE

### GETTING STARTED

3DR Radios provide an air-to-ground data link between the autopilot and your ground station laptop or tablet. Follow this guide to install the radios on your plane, copter, or rover. 3DR Radios arrive ready to use. Just mount and connect to view real-time data from your drone.

### PARTS



Two 3DR Radios in 915 or 433 mHz

Attach the antennas, and use either radio as an air or ground module.



Android adapter cable



Micro-USB cable

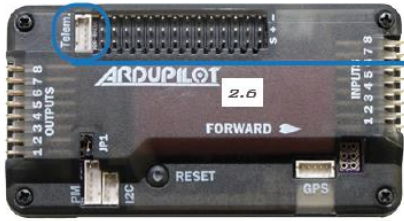


6-wire Pixhawk connector cable

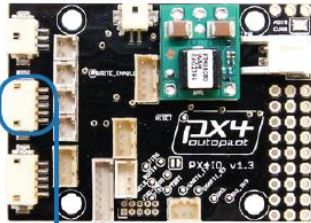


6-to-5-position APM and PX4 connector cable

# CONNECT TO AUTOPILOT



Connect to the APM 2.5 or 2.6 telemetry port using the 6-to-5-position cable.



Connect to the PX4 I/O telemetry port using the 6-to-5-position cable.

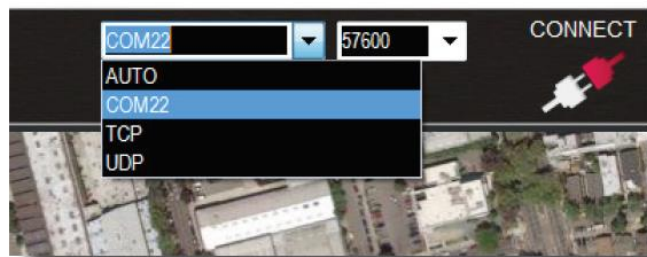


Connect to the Pixhawk telemetry port using the 6-wire cable.

# MOUNT

Mount the air module securely to your vehicle keeping the antenna clear of any propellers or moving components. Ensure that the antenna is oriented vertically for maximum range.

# CONNECT TO MISSION PLANNER

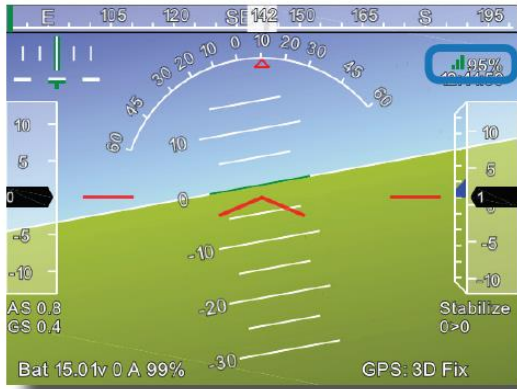


Mission Planner

Use the micro-USB cable to connect the ground module to your laptop. In Mission Planner and APM Planner ground station applications, select the communication option that shows **COM**, set the rate to **57600**, and select **Connect**. The radio will not connect unless the vehicle is powered. Use the **Flight Data** screen to view your vehicle's status and control missions in flight.

## LEARN MORE

about installing a mission planner application for your laptop or tablet and interacting with the autopilot using 3DR Radios (including retrieving flight data logs) at [planner.ardupilot.com](http://planner.ardupilot.com).



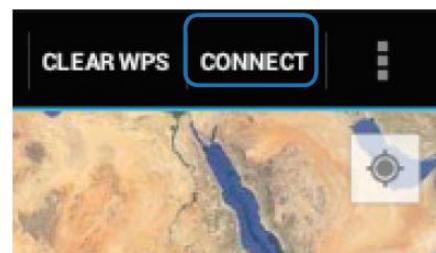
View the strength of the radio signal in the mission planner's flight data screen.

### TIPS

Orient the ground radio antenna vertically for maximum range.

## CONNECT TO TABLET

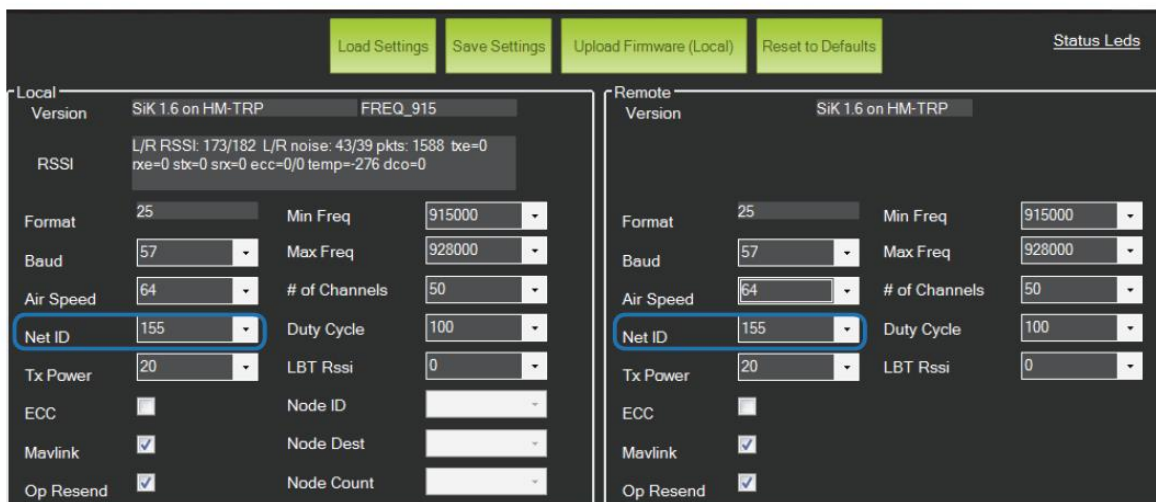
Connect the ground module to your tablet using the Android adapter cable. Connect the colored end to the tablet and the black end to the radio. In [DroidPlanner](#) or [Andropilot](#), select **Connect**.



DroidPlanner Flight Data screen

## SETTINGS

To change the radio settings in the mission planner, connect the radio to your computer, but do not select **Connect**. Radios can only be configured while unconnected to MAVLink. Select [Initial Setup](#), [3DR Radio](#), and [Load Settings](#) to configure the radios.



All settings should be the same for both modules. Ensure that the **Net ID** setting is identical on each radio to enable pairing. Select [Save Settings](#) to apply settings. For flying with friends, make sure your Net IDs do not conflict.

Use the configuration options on this screen to apply the correct airspace regulation requirements for your area. You are responsible for complying with all airspace regulations in your area, including frequency restrictions, power levels, and licenses. For more information on configuring 3DR Radios to comply with local regulations, visit the online documentation at [goo.gl/Tsrksf](http://goo.gl/Tsrksf).



# LED MEANINGS



Blinking green  
Searching for paired radio



Blinking red  
Transmitting data



Solid green  
Link established with paired radio



Solid red  
Firmware update mode

# RADIO DESCRIPTION



1  
2

- 1 Micro-USB port
- 2 6-wire cable connector
- 3 Antenna
- 4 Frequency
- 5 LED indicator



3  
4  
5

# SPECIFICATIONS

## Processing

- 100 mW maximum output power (adjustable)
- 117 dBm receive sensitivity
- Based on HopeRF's HM-TRP module
- RP-SMA connector
- 2-way full-duplex communication through adaptive TDM
- UART interface
- Transparent serial link
- MAVLink protocol framing
- Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)
- Configurable duty cycle
- Error correction corrects up to 25% of bit errors
- Open-source SIK firmware
- Configurable through Mission Planner & APM Planner

## Features

- Interchangeable air and ground modules
- 915 or 433 mHz
- Micro-USB port
- 6-position DF13 connector

## Dimensions

- 26.7 cm x 55.5 cm x 13.3 cm  
(without antenna)

## Power

- Supply voltage: 3.7-6 VDC (from USB or DF13)
- Transmit current: 100 mA at 30 dBm
- Receive current: 25 mA
- Serial interface: 3.3 V UART

# SUPPORT

For more information about mission planner applications and APM firmware, visit [ardupilot.com](http://ardupilot.com). For online documentation of 3DR Radios, visit [goo.gl/Tsrksf](http://goo.gl/Tsrksf).

For customer support, contact us at [help@3drobotics.com](mailto:help@3drobotics.com) or call our support line at +1 (858) 225-1414.

## **6.7 Datasheet GPS NEO-M8.**



# 1 Functional description

## 1.1 Overview

The NEO-M8 series of standalone concurrent GNSS modules is built on the exceptional performance of the u-blox M8 GNSS (GPS, GLONASS, BeiDou, QZSS, SBAS and Galileo-ready<sup>1</sup>) engine in the industry proven NEO form factor.

The NEO-M8 series provides high sensitivity and minimal acquisition times while maintaining low system power. The NEO-M8M is optimized for cost sensitive applications, while NEO-M8N/M8Q provides best performance and easier RF integration. The NEO form factor allows easy migration from previous NEO generations. Sophisticated RF-architecture and interference suppression ensure maximum performance even in GNSS-hostile environments.

The NEO-M8 series combines a high level of robustness and integration capability with flexible connectivity options. The future-proof NEO-M8N includes an internal Flash that allows simple firmware upgrades for supporting additional GNSS systems. This makes NEO-M8 perfectly suited to industrial and automotive applications.

The DDC (I<sup>2</sup>C compatible) interface provides connectivity and enables synergies with most u-blox cellular modules. For RF optimization the NEO-M8N/M8Q features an additional front-end LNA for easier antenna integration and a front-end SAW filter for increased jamming immunity.

u-blox M8 modules use GNSS chips qualified according to AEC-Q100, are manufactured in ISO/TS 16949 certified sites, and fully tested on a system level. Qualification tests are performed as stipulated in the ISO16750 standard: "Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment".

u-blox' AssistNow Assistance supply aiding information, such as ephemeris, almanac, rough last position and time, reduce the time to first fix significantly and improve the acquisition sensitivity. AssistNow data are with u-blox M8 supporting both GPS and GLONASS constellation for faster acquisition than a GPS-only assistance. The extended validity of AssistNow Offline data (up to 35 days) and AssistNow Autonomous data (up to 6 days) provide faster acquisition after long off time.



See section **Error! Reference source not found.** for more information concerning the NEO-M8 series related AssistNow Assistance.

## 1.2 Product features

Model	Type	Supply	Interfaces	Features	Grade
	GPS / QZSS GLONASS Galileo BeiDou Timing Dead Reckoning Precise Point Positioning Raw Data	1.65 V – 3.6 V 2.7 V – 3.6 V Lowest power (DC/DC)	UART USB SPI DDC (I <sup>2</sup> C compliant)	Programmable (Flash) Data logging Additional SAW Additional LNA RTC crystal Internal oscillator Active antenna / LNA supply Active antenna / LNA control Antenna short circuit detection / protection pin Antenna open circuit detection pin Frequency output	Standard Professional Automotive
NEO-M8N	• • R •	• •	• • • •	• • • • • T ○ •	
NEO-M8Q	• • •	• •	• • • •	• • • T ○ •	
NEO-M8M	• • •	• •	• • • •	• C ○	

○ = Optional, not activated per default or requires external components  
C = Crystal / T = TCXO

R = Galileo ready

<sup>1</sup> with future flash firmware update

## 1.3 Performance

Parameter	Specification			
Receiver type	72-channel u-blox M8 engine GPS L1C/A SBAS L1C/A QZSS L1C/A GLONASS L1OF BeiDou B1 Galileo E1B/C <sup>2</sup>			
NEO-M8N/Q	GNSS	GPS & GLONASS	GPS & BeiDou	GPS
Time-To-First-Fix <sup>3</sup>	Cold start	26 s	27 s	29 s
	Hot start	1 s	1 s	1 s
	Aided starts <sup>4</sup>	2 s	3 s <sup>5</sup>	2 s
Sensitivity <sup>6</sup>	Tracking & Navigation	-167 dBm	-165 dBm	-166 dBm
	Reacquisition	-160 dBm	-160 dBm	-160 dBm
	Cold start	-148 dBm	-148 dBm	-148 dBm
	Hot start	-156 dBm	-156 dBm	-156 dBm
NEO-M8M	GNSS	GPS & GLONASS	GPS & BeiDou	GPS
Time-To-First-Fix <sup>3</sup>	Cold start	27 s	28 s	30 s
	Hot start	1 s	1 s	1 s
	Aided starts <sup>4</sup>	4 s	6 s <sup>5</sup>	3 s
Sensitivity <sup>6</sup>	Tracking & Navigation	-164 dBm	-162 dBm	-163 dBm
	Reacquisition	-159 dBm	-159 dBm	-159 dBm
	Cold start	-147 dBm	-147 dBm	-147 dBm
	Hot start	-156 dBm	-156 dBm	-156 dBm
TCXO or Crystal	GNSS	GPS & GLONASS	GPS & BeiDou	GPS
Max navigation update rate	NEO-M8N	5 Hz	5 Hz	10 Hz
	NEO-M8M/Q	10 Hz	10 Hz	18 Hz
Velocity accuracy <sup>7</sup>		0.05 m/s		
Heading accuracy <sup>7</sup>		0.3 degrees		
Horizontal position accuracy <sup>8</sup>	Autonomous	2.5 m		
	SBAS	2.0 m		
Accuracy of time pulse signal	RMS	30 ns		
	99%	60 ns		
Frequency of time pulse signal		0.25 Hz...10 MHz (configurable)		
Operational limits <sup>9</sup>	Dynamics	≤ 4 g		
	Altitude	50,000 m		
	Velocity	500 m/s		

**Table 1: NEO-M8 performance in different GNSS modes (default: concurrent reception of GPS and GLONASS)**

<sup>2</sup> Ready to support Galileo E1B/C when available (NEO-M8N)

<sup>3</sup> All satellites at -130 dBm

<sup>4</sup> Dependent on aiding data connection speed and latency

<sup>5</sup> BeiDou assisted acquisition is not available with FW 2.01

<sup>6</sup> Demonstrated with a good external LNA

<sup>7</sup> 50% @ 30 m/s

<sup>8</sup> CEP, 50%, 24 hours static, -130 dBm, > 6 SVs

<sup>9</sup> Assuming Airborne < 4 g platform

## 2 Pin Definition

### 2.1 Pin assignment

NEO-M8N			
Top View			
13	GND	GND	12
14	ANT_ON/Reserved	RF_IN	11
15	Reserved	GND	10
16	Reserved	VCC_RF	9
17	Reserved	RESET_N	8
18	SDA	VDD_USB	7
19	SCL	USB_DP	6
20	TxD	USB_DM	5
21	RxD	EXTINT	4
22	V_BCKP	TIMEPULSE	3
23	VCC	D_SEL	2
24	GND	Reserved	1

Figure 2: Pin Assignment

No	Module	Name	I/O	Description
1	All	Reserved	I	SAFEBOOT_N (for future service, updates and reconfiguration, leave OPEN)
2	All	D_SEL	I	Interface select
3	All	TIMEPULSE	O	Time pulse (1PPS)
4	All	EXTINT	I	External Interrupt Pin
5	All	USB_DM	I/O	USB Data
6	All	USB_DP	I/O	USB Data
7	All	VDD_USB	I	USB Supply
8	All	RESET_N	I	RESET_N
9	All	VCC_RF	O	Output Voltage RF section
10	All	GND	I	Ground
11	All	RF_IN	I	GNSS signal input
12	All	GND	I	Ground
13	All	GND	I	Ground
14	NEO-M8N	ANT_ON	O	Antenna control
	NEO-M8M	Reserved	-	Reserved
	NEO-M8Q	ANT_ON	O	Antenna control
15	All	Reserved	-	Reserved
16	All	Reserved	-	Reserved
17	All	Reserved	-	Reserved
18	All	SDA	I/O	DDC Data if D_SEL = 1 (or open)
	All	SPI CS_N	I/O	SPI Chip Select if D_SEL = 0
19	All	SCL	I/O	DDC Clock if D_SEL = 1 (or open)
	All	SPI CLK	I/O	SPI Clock if D_SEL = 0
20	All	TxD	O	Serial Port if D_SEL = 1 (or open)
	All	SPI MISO	O	SPI MISO if D_SEL = 0
21	All	RxD	I	Serial Port if D_SEL = 1 (or open)
	All	SPI MOSI	I	SPI MOSI if D_SEL = 0
22	All	V_BCKP	I	Backup voltage supply
23	All	VCC	I	Supply voltage
24	All	GND	I	Ground

Table 5: Pinout

Pins designated Reserved should not be used. For more information about Pinouts see the NEO-M8 Hardware Integration Manual [1].

## 4.2 Operating conditions



All specifications are at an ambient temperature of 25°C. Extreme operating temperatures can significantly impact specification values. Applications operating near the temperature limits should be tested to ensure the specification.

Parameter	Symbol	Module	Min	Typical	Max	Units	Condition	
Power supply voltage	VCC	NEO-M8M	1.65		3.6	V		
		NEO-M8N/Q	2.7	3.0	3.6	V		
Supply voltage USB	VDDUSB	All	3.0	3.3	3.6	V		
Backup battery voltage	V_BCKP	All	1.4		3.6	V		
Backup battery current	I_BCKP	All		15		µA	V_BCKP = 1.8 V, VCC = 0 V	
SW backup current	I_SWBCKP	NEO-M8M		22		µA	VCC = 3 V	
		NEO-M8N/Q		30		µA	VCC = 3 V	
Input pin voltage range	V <sub>in</sub>	All	0		VCC	V		
Digital IO Pin Low level input voltage	V <sub>il</sub>	All	0		0.2*VCC	V		
Digital IO Pin High level input voltage	V <sub>ih</sub>	All	0.7*VCC		VCC	V		
Digital IO Pin Low level output voltage	V <sub>ol</sub>	All			0.4	V	I <sub>ol</sub> = 4mA	
Digital IO Pin High level output voltage	V <sub>oh</sub>	All	VCC-0.4			V	I <sub>oh</sub> = 4mA	
Pull-up resistor for RESET_N (internal)	R <sub>pu</sub>	All		11		kΩ		
USB_DM, USB_DP	V <sub>inU</sub>	All	Compatible with USB with 27 Ω series resistance					
VCC_RF voltage	VCC_RF	All		VCC-0.1		V		
VCC_RF output current	ICC_RF	All			50	mA		
Receiver Chain Noise Figure <sup>14</sup>	NF <sub>tot</sub>	NEO-M8M		3.5		dB		
		NEO-M8N/Q		2.0		dB		
Operating temperature	T <sub>opr</sub>	All	-40		85	°C		

**Table 8: Operating conditions**



Operation beyond the specified operating conditions can affect device reliability.

## 6.8 Datasheet Transmissor FPV.

# RC832

## Instruction Manual

### Specification:

#### 1. Technical specification

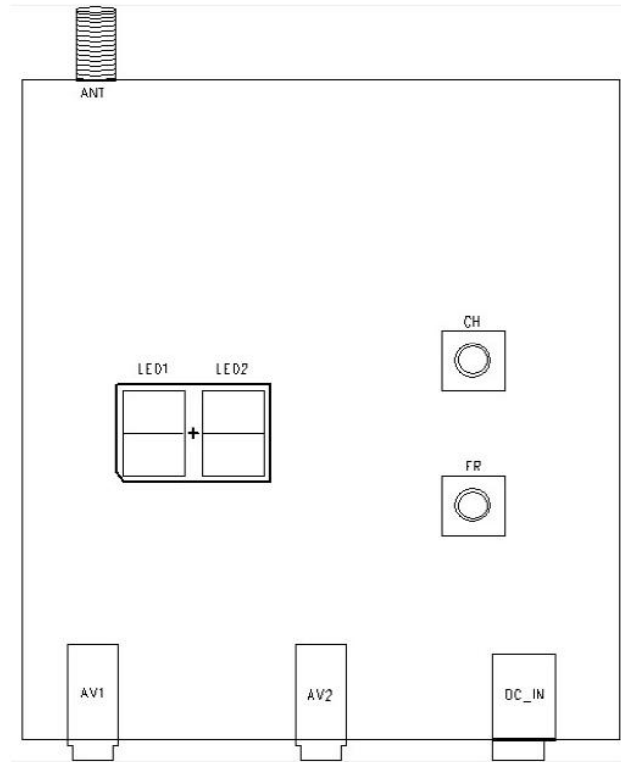
RC832 5.8G Wireless receiver	Sensitivity	$\leq 90\text{dBm}$
	Working Frequency	ISM 5.8GHz
	Available Channel	32CH
	Power supply	DC 12V
	Consumption Current	200mA, Max.
	Antenna Input Impedance	50ohm Typ.
	Antenna Connector	SMA
	Antenna Gain	2dBi
	Video Output Level	1.0Vp-p Typ, 75 $\Omega$
	Audio Output Level	1.0Vp-p Typ, 10K $\Omega$
	Audio Carrier	6.5MHz
	Type Standard	NTSC/PAL
	Dimension (L x W x H)	80x65x15 mm
Weight	85 g	

#### 2. Features:

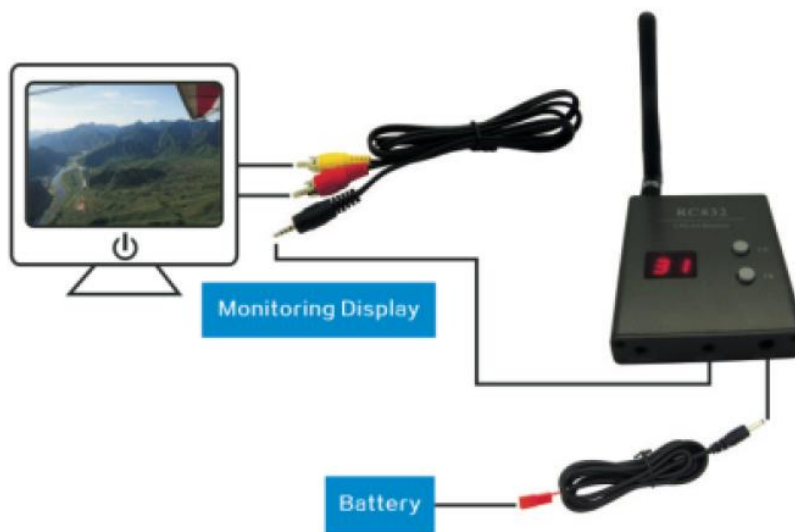
- **32 channels:** Cover A, B, E bands and F band (Airwave band), 4 bands and all frequencies compatible;
- **Two switching buttons:** CH button for frequencies channels switching, FR button for frequencies bands switching;
- **Two digital display:** one for CH and the other for FR, real-time positioning which frequency band and which channel received;
- **Power off memory:** Replay the very last frequency band and channel
- **Independent video and audio signal outputs**

#### 3. Operation Instructions:

##### A. Pin Description:



### B. Application example



### C. Channel and Digital tube display

Power on, press the “CH” button to change channel, “CH” digital display will change synchronously, “CH” digital display changes cyclically from 1 to 8.

### D. Frequent and Digital tube display

Power on, press the “FR” button to change frequency band, “FR” digital display will change synchronously, “FR” digital display changes cyclically from 1 to 4.

FR1 for A band, FR2 for B band, FR3 for E band, FR4 for F band(Airwave band).

**E. Frequency and channel frequency table:**

FR \ CH		CH							
		CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
FR	FR1 or (A)	5865M	5845M	5825M	5805M	5785M	5765M	5745M	5725M
	FR2 or (B)	5733M	5752M	5771M	5790M	5809M	5828M	5847M	5866M
	FR3 or (E)	5705M	5685M	5665M	5645M	5885M	5905M	5925M	5945M
	FR4 or (F)	5740M	5760M	5780M	5800M	5820M	5840M	5860M	5880M

**4. Standard Accessories:**

- SMA Standard Type Dipole Antenna \*2
- AV Output Cable \*1
- Power cable for RC832 \*1
- Power cable for TS832 \*1
- User Manual \*1

**NOTICE:**

Please connect every part according to the instruction, please don't take down and refit this product.



## 6.9 Datasheet ulleres FPV.

### Product parameters

Comfort: designed according to ergonomic, fit the contours of the face, feel better;  
Environmental sponge eye ring, more comfortable, less ambient light;

Adjustable fillet: settled three-point fillet can reduce the pressure of long-time wear to the head.  
Myopia below 400°no need to wear glasses;

Dimension(mm): 148x176x102

Screen size: 4.3

Screen resolution: 480x272

Language choice: multilinguals can be choosed in osd menu(English, French, Italian and so on).  
Intensity control, contrast control

Working temperature: -20°C-80°C

Ultra-lightweight design: 256g(battery not included)

Battery weight: 24g

Power voltage: 800mah 7.4V standard configuration(2S smart lipo battery, with power display function,  
supports USB 5V charging)

Antenna: 5.8G 3dB

Power dissipation: 400mA

Frequency channel: built-in 40CH 5.8GHz A/V automatic search receiver.

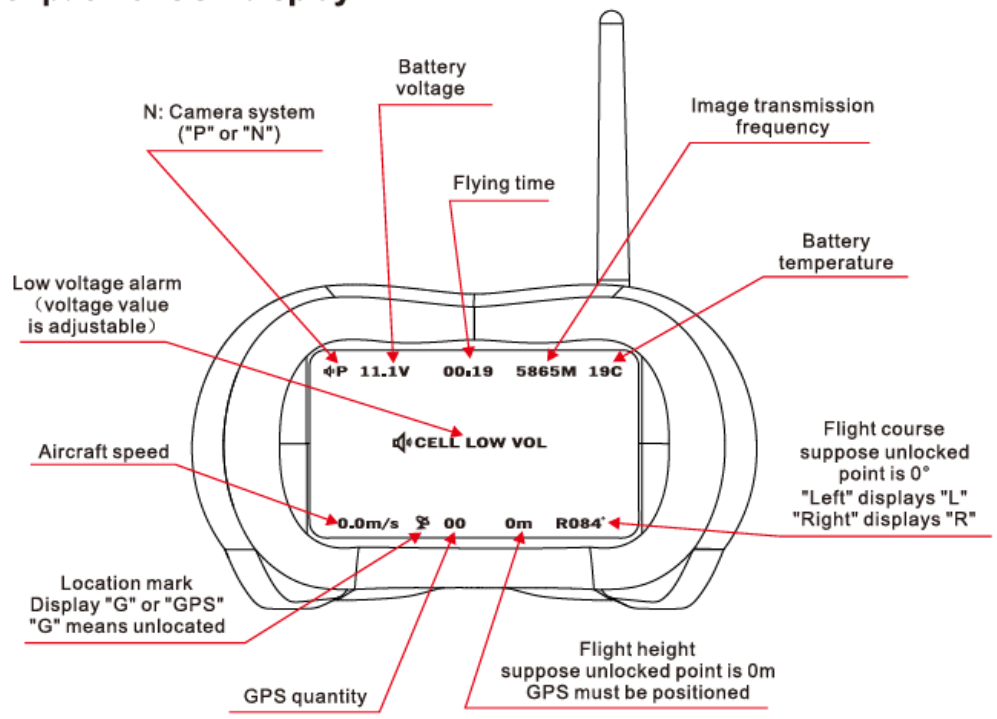
### Frequency and channel frequency table

FR \ CH	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
A	5865	5845	5825	5805	5785	5765	5745	5725
B	5733	5752	5771	5790	5809	5828	5847	5866
C	5705	5685	5665	5645	5885	5905	5925	5945
D	5740	5760	5780	5800	5820	5840	5860	5880
E	5658	5695	5732	5769	5806	5843	5880	5917

Language choice:  
multilinguals can be  
chosen in osd  
menu(English, French,  
Italian and so on).



**\* Description of OSD display**



## **6.10 Enllaç transmissor-receptor.**

### 3 - The receiver, the pairing (binding), range test :

- The receiver (RF9X-V2) did not require physical association with the module to be initialized (see the pairing below). It weighs 18g with 8 channels plus a battery socket. His antenna is a dipole single wire, its end covered with red shrink tubing is larger diameter. The ideal position of such an antenna on the model is vertical. If not possible you can align the fuselage provided away elements made of metal or carbon, battery and controller.

- Pairing (binding) association The receiver in this case the radio has already been associated with the transmission module 2.4GZ, so it is operational. To attach a new receiver, you must go into the menu "System Settings" then "MODEVAT" and tune the radio to PPM mode and then turn it off. Warning there are errors in the instruction manual PDF (inversion).

Insert the special cable (loop) in the file "BATTERY" the receiver and not in the sheet 'BIND' as indicated). Connect the receiver battery to the receiver in position 'BIND and wait until the LED flashes red.



Insert the special cable (loop) in the file "BATTERY" and connect the receiver battery in position "BIND", wait until the LED flashes red.

Press the button 'Test Range bind' the transmission module (back of radio) and, without releasing it, turn on the transmitter, the LED will stop flashing and remain lit constantly. Release the button and turn off the radio module. Then remove the special cord and disconnect the receiver battery, the receiver is ready. The effect is immediate and does not allow more than 3sec button 'test range bind' button.



Press the button 'Test Range bind' the transmission module (on the back of the radio), without releasing, turn on the transmitter.