

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO

MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

Desarrollo de un vehículo aéreo no tripulado como base para futuras investigaciones

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Realizado por: Urs Valentin Wetzel

TUTOR: Ignacio Álvarez García

COTUTOR: Juan José Serrano Martín

Gijón, a 21 de julio de 2017

DECLARACIÓN

Yo, Urs Wetzel declaro que el presente Trabajo de Fin de Máster, “Desarrollo de un vehículo aéreo no tripulado como base para futuras investigaciones” es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente

Valencia, 14, julio, 2017

Signatura:

AGRADECIMIENTOS

Después de un semestre intenso me gustaría agradecer a la gente que me han apoyado durante este trabajo. Me gustaría agradecer a mis tutores Ignacio Álvarez García y Juan José Serrano Martín. También doy las gracias a Miguel Ángel José Prieto, que me ha ayudado con la gestión de la documentación. Me gustaría dar las gracias al laboratorio de ITACA y especialmente a Ricardo, que siempre me ha prestado su ayuda. Reconozco el apoyo del laboratorio de impresoras 3D del instituto ETSID, que me han facilitado imprimir todas las piezas. También me gustaría agradecer al mejor banco del mundo, mis padres que han hecho posible este máster. Al final quiero nombrar a Clara y especialmente a Clarinchen, sin ella no habría sido posible escribir este trabajo en español.

¡Muchas gracias a todos!

Urs Wetzel

Valencia 11.07.2017

RESUMEN

Desarrollo de un vehículo aéreo no tripulado como base para futuras investigaciones

El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de un dron con la posibilidad de transportar una carga máxima de medio kilo y que permita colocar diferentes tamaños de cargas. Además, se ha de poder utilizarlo en un gran rango de tareas. Se ha utilizado una impresora 3D para fabricar la estructura diseñada. Se ha elegido una placa con mayor capacidad que la necesaria para el control de los motores y de los sensores incorporados a la propia placa, con el fin de poder añadir futuras aplicaciones como el procesamiento de imágenes. El software utilizado es de tipo abierto para tener flexibilidad y costes bajos.

En este trabajo se ha estudiado: el nivel de la técnica de los UAV's (drones) y sus clasificaciones; las diferentes placas que existen actualmente, así como los distintos softwares de tipo abierto y las funciones que realizan. Basándose en este estudio y en los objetivos, se ha realizado el dimensionamiento general del dron. Justificando debidamente la selección de los componentes elegidos, tales como son:

- para la parte electrónica la placa de BeagleBoneBlue que ya contiene todo el hardware necesario como IMU, barómetro, wifi etc.

- como software el Ardupilot, uno de los softwares más potentes de tipo abierto que hay actualmente. El sistema operativo de la placa es Debian GNU/Linux 8.

Se ha utilizado el programa eCalc para realizar los cálculos necesarios para el dimensionamiento de la propulsión del motor, la batería y la hélice.

La estructura completa del modelo del Dron se ha desarrollado en 3D con el programa SolidWorks. Los datos de este modelo se han utilizado para poder imprimir las piezas necesarias y también, para hacer cálculos de FEM y para verificar las dimensiones.

La estructura mecánica es de tipo H para tener la flexibilidad requerida. Se han utilizado tubos de carbono/kevlar y piezas impresas con una impresora 3D de tipo filamento de la empresa Zortrax para poder conseguir una rigidez y una resistencia suficientemente altas.

Finalmente, se ha realizado un test de los componentes que asegurará la fuerza del motor y la máxima corriente. Y también, se han realizado pruebas de los controladores de Ardupilot ajustando los valores de control con un procedimiento empírico hasta conseguir el funcionamiento deseado.

PALABRAS CLAVE

Dron - Quadricoptero - Impresora3D - Zortrax - Ardupilot – BeagleBoneblue

ABSTRACT

Development of an unmanned aerial vehicle as a basis for future investigations

The main objective of this work is the development of a drone with the possibility of transporting a load with a maximum weight of half a kilo. It should be possible to place different loads and be able to use the vehicle in a wide range of tasks. A 3D printer has been used to manufacture the designed structure. The control of the motors that allows raising the drone and directing it to a point, are controlled by a Linux board with sufficient power to do other tasks meanwhile. The software used is open source for flexibility and low-cost reasons.

In this work has been studied: the state of art of UAVs and their classifications, the different boards that currently exist, as well as different open source software and the functions they perform. Based on this study and the objectives, a table of the requirements and an overall dimensioning of the drone has been made. Duly justifying the selection of the chosen components such as:

- for the electronic part; the BeagleBoneBlue board which already contains all necessary hardware such as IMU, barometer, Wi-Fi etc.

- as software the Ardupilot, one of the most powerful open source software available. The operating system on the board is Debian GNU / Linux 8.

The eCalc program has been used to carry out the necessary calculations for the sizing of the propulsion of the engine, the battery and the propeller.

The complete structure of the drone model has been developed in 3D with SolidWorks. The data of this model has been used to be able to print the necessary parts as well as to make FEM calculations and to verify the dimensions.

The mechanical structure is a H-type configuration to have the required flexibility. Carbon/kevlar tubes with a Zortrax 3D filament type printer printed parts have been used to achieve high enough rigidity and strength.

Finally, a test of the components has been carried out to ensure the strength of the motor and the maximum current. The Ardupilot controllers have been tested as well by adjusting the control values with an empirical procedure until the desired behavior could have been achieved.

PALABRAS CLAVE

Drone - Quadcopter - 3DPrinter - Zortrax - Ardupilot - BeagleBoneblue

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DEFINICIÓN	1
1.2. HISTORIA.....	1
1.3. CAMPOS DE APLICACIONES.....	2
1.4. OBJETIVOS	3
1.5. MODO DE PROCEDER	4
2. NIVEL DE LA TÉCNICA	5
2.1. CONCEPTO.....	5
2.2. HARDWARE /PLACA.....	7
2.3. SOFTWARE	8
2.4. FUNCIONAMIENTO DE UN CUADRICÓPTERO	10
3. DESARROLLO/ PUESTA EN MARCHA	13
3.1. DIMENSIONAMIENTO GENERAL	13
3.2. SUBSISTEMA ELECTRÓNICO	15
3.2.1. <i>Placa principal y Sensores</i>	15
3.2.2. <i>Esquema eléctrico</i>	18
3.2.3. <i>Dimensionamiento de la propulsión</i>	19
3.3. SUBSISTEMA MECÁNICO	25
3.3.1. <i>Cálculos / FEM / Dimensionamiento</i>	28
3.3.2. <i>Fabricación/ Montaje</i>	42
3.4. SUBSISTEMA SOPORTE LÓGICO	46
3.4.1. <i>Implementación de Ardupilot</i>	46
4. PRUEBAS	49
4.1. DISPOSICIONES LEGALES/NORMATIVAS	49
4.1.1. <i>Normativa de Alemania</i>	49
4.1.2. <i>Normativa de España</i>	49
4.2. MODOS DE VOLAR	50
4.3. MOTOR/REGULADOR.....	51
4.4. CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS PID	52
4.5. PRIMER VUELO	55
5. PRESUPUESTO	57
6. CONCLUSIONES	59
6.1. LÍNEAS FUTURAS	60
BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXO	65
1. <i>Calendario</i>	65
2. <i>Dimensionamiento impulsión</i>	67
3. <i>Ficha de datos del motor V3508 380</i>	68
4. <i>Selección perfiles</i>	69
5. <i>Valores característicos de los tubos</i>	72
6. <i>Modulo conexión tubos</i>	73
7. <i>Soporte placa</i>	74

8.	<i>Soporte aterrizar</i>	75
9.	<i>Caja</i>	76
10.	<i>Conexión tubos aterrizar</i>	77
11.	<i>Conexión motor</i>	78
12.	<i>Soporte placa batería</i>	79
13.	<i>Caperuza</i>	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ehang 184	2
Figura 2 Prototipo de Amazon	2
Figura 3 Tipos de UAV	5
Figura 4 VTOL [7]	5
Figura 5 Coaxial copter con mecanismo de acción único [8]	5
Figura 6 Hélice individual con motor de combustión [9]	6
Figura 7 Clasificación de los UAV [10].....	6
Figura 8 Sentimientos de giro	10
Figura 9 Fuerzas del dron.....	10
Figura 10 BeagleBoneBlue [20].....	16
Figura 11 Principio del funcionamiento del acelerómetro de Bosch	17
Figura 12 Principio del funcionamiento del girómetro de Bosch	17
Figura 13 Esquema eléctrico	18
Figura 14 Logic Level Shifter de Sparkfun.....	19
Figura 15 DC-DC convertidor.....	19
Figura 16 Módulo de radio.....	19
Figura 17 Motor sin escobillas con los imanes exterior [13]	20
Figura 18 Tipos baterías [24]	21
Figura 19 Inversor trifásico [44]	22
Figura 20 Fuerzas aplicadas en el soporte.....	30
Figura 21 Relleno con diferentes patrones	34
Figura 22 Fuerzas aplicadas pieza conexión tubos	35
Figura 23 Momento conexión tubo	35
Figura 24 Fuerza tracción conexión tubo	35
Figura 25 Momento de apriete [36].....	36
Figura 26 FEM conexión tubos 1	37
Figura 27 Conexión tubos diseño 1.....	37
Figura 28 FEM conexión tubos 2.....	37
Figura 29 Conexión tubos diseño 2.....	37
Figura 30 Torsión resultando de la guiñada	38
Figura 31 FEM conexión tubos	38
Figura 32 FEM conexión Motor.....	39
Figura 33 FEM soporte batería.....	39
Figura 34 FEM soporte batería con fuerza mayor y modificado	40
Figura 35 FEM soporte batería con fuerza mayor.....	40
Figura 36 FEM soporte aterrizar	41
Figura 37 Momento soporte aterrizar	41
Figura 38 Diseño completo del dron con Solid Works	42
Figura 39 Proceso de imprimir como ejemplo con la pieza caja	42
Figura 40 Piezas mecanizados.....	43
Figura 41 Menú de ajustar de la impresora	44
Figura 42 Conexiones batería reguladores	45
Figura 43 Placa, DC/DC convertidor, interruptor, convertidor lógico.....	45
Figura 44 Dron completa.....	45
Figura 45 Establecer conexión vía wifi.....	47
Figura 46 Establecer conexión vía radio	47
Figura 47 Configuración de pruebas del motor.....	51
Figura 48 Regulador PID [41].....	52
Figura 49 Ajustar controladores PID de Mission Planner.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Modo de proceder	4
Tabla 2 Comparación de software.....	9
Tabla 3 Requerimientos mecánicos.....	13
Tabla 4 Requerimientos eléctricos	15
Tabla 5 Peso componentes	23
Tabla 6 Valores característicos propulsión	24
Tabla 7 Componentes elegidos	24
Tabla 8 Tabla morfológico	26
Tabla 9 Valores característicos de las fibras [28]	28
Tabla 10 Propiedades de materiales [23]	30
Tabla 11 Tensiones, flexiones tubos	31
Tabla 12 Características mecánicas.....	34
Tabla 13 Fuerzas aplicadas	35
Tabla 14 Tiempo de imprimir	44
Tabla 15 Valores Motor medido	51
Tabla 16 Valores Motor SunnySky	51
Tabla 17 Valores Ziegler-Nichols	53
Tabla 18 Costes de mano de obra.....	57
Tabla 19 Costes materiales eléctricos	57
Tabla 20 Costes materiales mecánicos	58
Tabla 21 Costes totales.....	58

NOMENCLATURA

SÍMBOLOS

<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Descripción</i>
F	N	Fuerza
l	mm	Longitud
E	Pa	Módulo de Young
I	m ⁴	Segundo momento de inercia
I	A	Corriente
α	m	Distancia fibra neutra
σ	N/m ²	Tensión
M	N/m	Momento
W	m ³	Momento de resistencia
n	-	Numero
T	s	Periodo de oscilación
d	m	Diámetro
μ	-	Coefficiente de fricción
α	°	Angulo
Q	Ah	Carga electrica
K _p	-	Constante de proporcionalidad
K _i	-	Constante de integración
K _d	-	Constante de derivación
U(t)	-	Salida del controlador
K _v	-	Constante de tiempo
K _n	-	Constante de tiempo

ABREVIATURAS Y SIGLAS

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado
UAS	Unmanned Aerial System
RPA	Remotely Piloted Aircraft
OSD	On Screen Display
FPV	First Person View
VTOL	Vertical Take-Off and Landing
GCS	Ground Control Station
OS	Sistema Operativo
GPS	Global Positioning System
I2C	Inter-Integrated Circuit
ADC	Analog Digital Converter
FFF	Fused Filament Fabrication
BEC	Battery Eliminator Circuit
ESC	Electronic Speed Controller
PPM	Pulse Position Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
CAD	Computer Aided Design
SLS	Selective Laser Sintering
3DP	3D Printing
FDP	Fused Deposition Modelling
FPV	First Person View
HALE	High Altitude Long Endurance
MALE	Medium Altitude Long Endurance
TUAV	Tactical Unmanned Aerial Vehicle
MUAV	Micro Unmanned Ariel Vehicle
SSH	Secure Shell
CPU	Central Processing Unit
SD	Secure Digital
eMMC	Embedded Multimedia Card

1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) o más coloquiales drones, han ido ganando importancia en los últimos años. Sin embargo, este sistema tiene más antigüedad de lo que se cree en realidad. Los drones tienen sus orígenes en el sector militar; pero al igual que otras tecnologías, en los últimos años, han ganado cada vez más importancia en el sector comercial y en el mercado civil. En esta sección, se define y se explica brevemente la historia y procedencia de los vehículos aéreos no tripulados. Además, se enumeran los posibles campos de aplicación y el modo de proceder para este trabajo.

1.1. Definición

Los vehículos aéreos no tripulados, conocidos en inglés como unmanned aerial vehicles (UAV). [1] El nombre dron procede del inglés (drone)/ del alemán (Drohne) y hace referencia a la abeja macho o zángano. En sus inicios, el sector militar desarrollo un vehículo no armado cuyo único objetivo era para realizar ejercicios de tiros. Así mismo, el zángano tiene también un solo trabajo, aparearse con la abeja madre y morir después. Así, se puede entender la conexión de los nombres. [2] Por eso, el nombre dron y UAV tienen el mismo significado en el sentido de la palabra. Aunque UAV es la palabra más oficial y dron se puede considerar como una palabra más coloquial. Como su nombre indica, vehículo aéreo no tripulado, significa que no hay piloto en el vehículo. Además, para que se pueda decir que es un UAV requiere la cualidad de reutilización, que significa que puede volver a la tierra; por eso, por ejemplo, un misil no es un UAV. [3] La conducción puede tener diferentes grados de autonomía, la más simple sería con un piloto que está en el suelo y mantiene un control vía telecontrol, hasta un comportamiento del UAV completamente autónomo.

1.2. Historia

Uno de los primeros conocimientos de la existencia de UAV y su uso datan del año 1849. En ese tiempo, Austria bombardeaba Venecia con globos sin tripulación. El desarrollo de los UAV no hubiera sido posible sin grandes avances tecnológicos como la radio. El telégrafo fue utilizado por primera vez en 1858, para conectar Europa y los Estados Unidos; poco después, en 1898 Nikola Tesla mostró en Nueva York un sistema de control para un barco a través de señales de radio. En 1931 el “Royal Air Force” utilizó aviones dirigidos por radio para hacer ejercicios de tiro en los entrenamientos de los pilotos de combate. En los años 60, los Estados Unidos emplearon los UAV sobre todo para efectos informativos en Cuba, Vietnam, China y Corea del Norte. Entre los años 1955 y 1975 en la guerra de Vietnam el Air Force utilizó los UAV para localizar misiles tierra-aire. Más tarde, en Europa en los años 1998 y 1999 durante la guerra del Kosovo, los UAV fueron utilizados para poner a disposición marcas de guiados de láser para aviones de combate F16. En el año 1995, los Estados Unidos introdujeron el UAV “Predator” que tenía además de la capacidad de la supervisión y permitía utilizar

Introducción

misiles. En el año 1998, tuvo lugar el primer vuelo del UAV “Global Hawk”, el cual es hasta el momento, el UAV más grande fabricado en serie.

El sector militar es el mayor consumo en el mercado de los UAV; aunque el sector privado está creciendo cada vez más. Así por ejemplo en 2014, DHL empezó a hacer pruebas de envío de paquetes con un UAV entre la ciudad de Norden y la isla Juist en Alemania. Dos años después, Amazon realizó la primera entrega de un paquete con un UAV en Inglaterra [4], Figura 2.

En 2016, la empresa Ehang presentó el primer “UAV” para transportar a un pasajero en el “Consumer Electronics Show” en Las Vegas. El modelo de UAV empleado fue un octocóptero de tipo coaxial, que puede transportar un peso de hasta 100 kg, Figura 1 . No tiene sentido, hablar de un UAV que puede transportar una persona, ya que se definen como vehículo no tripulado; pero debe mencionarse porque al final, el funcionamiento es semejante al de un cuadricóptero. El funcionamiento es casi autónomo y, según la empresa, puede volar cualquier persona. El pasajero solo tiene que poner el destino y el vehículo se encargará del resto.



Figura 1 Ehang 184



Figura 2 Prototipo de Amazon

1.3. Campos de aplicaciones

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, los drones han sido empleados en gran medida en el campo militar. Por otro lado, también tienen gran aplicación en el sector civil y comercial.

En la siguiente sección están clasificadas las posibles aplicaciones en siete áreas.

- 1) Área de vigilancia policial. Por ejemplo, un UAV podría sustituir un helicóptero en muchas situaciones. Un UAV se puede emplear para vigilar fronteras y costas o en general también para la persecución. Adicionalmente, existe la posibilidad de emplear el UAV para monitorear el tráfico y las aglomeraciones.
- 2) Área de apoyo logístico a los bomberos. El empleo de UAV aquí puede hacer el trabajo de los bomberos más seguro y fácil y permitir además poder conseguir mejores resultados. Por ejemplo, se pueden emplear para la vigilancia o extinción de incendios. En catástrofes naturales, se podrían emplear para hacer una peritación de daños o directiva en general. Además, se podrían emplear para buscar y rescatar personas desaparecidas en la montaña o en lugares con difícil acceso.

- 3) Otro grupo es el sector de la energía, la industria de aceite y gas y también de la red eléctrica. Los UAV pueden ayudar en este grupo a mejorar la vigilancia y la seguridad y así asegurar el buen funcionamiento.
- 4) Otro campo es la agricultura, la silvicultura y el sector pesquero. El uso de UAV puede ser por ejemplo el control de plagas, la optimización de los recursos, el control medioambiental o para la siembra de plantas de cultivo.
- 5) Área de observaciones terrestres y teledetección. Este campo se centra en la vigilancia climática, la fotografía aérea, la cartografía y la vigilancia de eventos sísmicos, de incidentes graves y de contaminación.
- 6) Sector de la comunicación y radio fusión. En este caso, se puede utilizar los UAV para proporcionar una buena cobertura de comunicación. [5]
- 7) Área de transportes y de logística, tal como se ha mencionado en el apartado de historia. Además, se pueden utilizar para transportar medicamentos en regiones de difícil acceso. Permitiendo así, ayudar a la población. [6]
- 8) Una aplicación curiosa que debe ser mencionado aquí es un cuadricoptero que se han desarrollado en el Georgia Institute of Technology in Atlanta para tener condiciones de cero g. Como es difícil y muy caro hacer experimentos en condiciones con cero g se han hecho un cuadricoptero con hélices especiales para producir para 5 segundos un ambiente de cero g.

1.4. Objetivos

El objetivo de este trabajo es desarrollar un cuadricoptero para poder transportar cargas, con sensores adicionales y tener además una flexibilidad para montar dichas cargas. La carga máxima son 0,5 kg y debe ser posible montar la carga en el centro abajo del UAV tal como fuera del centro para montar por ejemplo una camera. El objetivo de tiempo de volar son 15-20 min. El UAV debe tener las capacidades que corresponden con el nivel de la técnica, como control remoto, vuelo automático, aterrizaje automático y la posibilidad de vuelo de primera persona (FPV). La placa utilizada debería ser suficientemente potente para trabajos aparte como procesamiento de imágenes. El software tiene que ser de tipo abierto para tener la posibilidad de hacer cambios tal como añadir partes. También debería ser posible conectar el dron con una estación de tierra vía radio o wifi. Para reducir costes y tiempo de desarrollo se han de fabricar el mayor número posible de componentes con una impresora 3D y construir un prototipo. Se han de realizar las pruebas que permitan demostrar la idoneidad fundamental del sistema desarrollado. El proceso a seguir para alcanzar el objetivo consta de las siguientes fases:

- Búsqueda bibliográfica e investigación del nivel de la técnica
- Selección del soporte físico y soporte lógico
- Desarrollo del concepto
- Construcción e interpretación de los componentes

Introducción

- Fabricación y montaje de los componentes
- Integración del soporte lógico
- Pruebas

1.5. Modo de proceder

El concepto analítico de este trabajo está dividido en cuatro partes (Tabla 1), estas son: la preparación, el desarrollo, las pruebas y la documentación.

La preparación se divide en la familiarización con el tema, la investigación del nivel de la técnica y la selección del soporte físico, así como la selección del software de tipo abierto.

El desarrollo está dividido en tres otras subcategorías, la electrónica, la mecánica y el software. Para empezar, es necesario hacer un dimensionamiento completo del UAV, determinando así el tamaño, peso, número de motores etc. La parte electrónica incluye además la selección de los sistemas electrónicos. La parte mecánica incluye el diseño del soporte físico, los cálculos e interpretaciones y finalmente, la fabricación y el montaje del prototipo. La última parte del desarrollo se ciñe a la parte informática. En ella se ha de implementar el software en el microprocesador elegido.

Una vez construido el prototipo se podrán realizar las pruebas de vuelo y las configuraciones de los parámetros de control.

La documentación es un proceso continuo que empieza desde el primer día hasta el último día. Los procesos temporales exactos se pueden obtener del calendario (Anexo).

Tabla 1 Modo de proceder

Preparación
<ul style="list-style-type: none">• Familiarización con el tema• Investigación del nivel técnica• Decisión del soporte físico (placa base) y software
Desarrollo
<ul style="list-style-type: none">• Dimensionamiento general
<i>Electrónica</i>
<ul style="list-style-type: none">• Dimensionamiento de los componentes electrónicos
<i>Mecánica</i>
<ul style="list-style-type: none">• Diseño del soporte físico• Simulación FEM fuerzas• Fabricación/ montaje
<i>Software</i>
<ul style="list-style-type: none">• Implementación del software
Pruebas
Documentación

2. NIVEL DE LA TÉCNICA

En este capítulo se estudia el estado del arte de la técnica de los vehículos aéreo no tripulados. Se ha desarrollado en tres partes: por un lado, el concepto que implica los diferentes UAV que hay; por otro lado, el hardware, que muestra las placas más conocidas que existen actualmente en el mercado de los UAV y finalmente, los softwares de tipo abierto más potentes que existen.

2.1. Concepto

Hay muchos tipos diferentes de UAV. Una opción sería clasificar los UAV según la técnica, (Figura 3). Primero, se puede diferenciar entre UAV con alas fijas y con alas rotativas. Los UAV con alas fijas están divididos entre aviones y vehículos de tipo VTOL (Vertical Take Off and Landing). Un UAV con alas fijas presenta la ventaja de tener un alcance más elevado. Un VTOL combina las dos ventajas de un avión y un còptero, con la desventaja de ser más pesado.

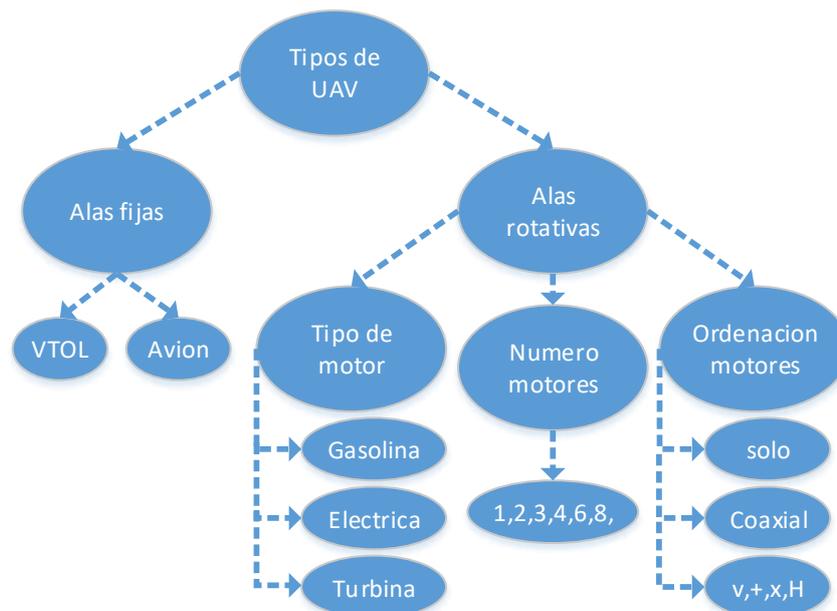


Figura 3 Tipos de UAV



Figura 4 VTOL [7]



Figura 5 Coaxial copter con mecanismo de acción único [8]

Nivel de la técnica

Los UAV con alas rotativas se pueden dividir según los diferentes tipos de motores, el número de motores y la ordenación de motores. Los tipos de motores pueden ser de tipo gasolina, eléctrico o turbina o combinado. El número de motores pueden ser 1, 2, 3, 4, 5 u 8. La ordenación de los motores puede ser solo, coaxial o conectado de tipo V, +, X o H. Un ejemplo para un UAV con una hélice y con un motor de gasolina se muestra en la Figura 6. Se trata de un UAV del ejército de los Estados Unidos. Él vehículo tiene válvulas debajo de la hélice para evitar rotaciones causado del momento del motor y para controlar la dirección de vuelo en general. En la Figura 6 se puede ver un ejemplo de un UAV con motores ordenados coaxial. Es un proyecto de investigación que además no necesita motores para cambiar los ángulos de ataque de las hélices. Eso se puede hacer solo con cambiar el par de los motores.



Figura 6 Hélice individual con motor de combustión [9]

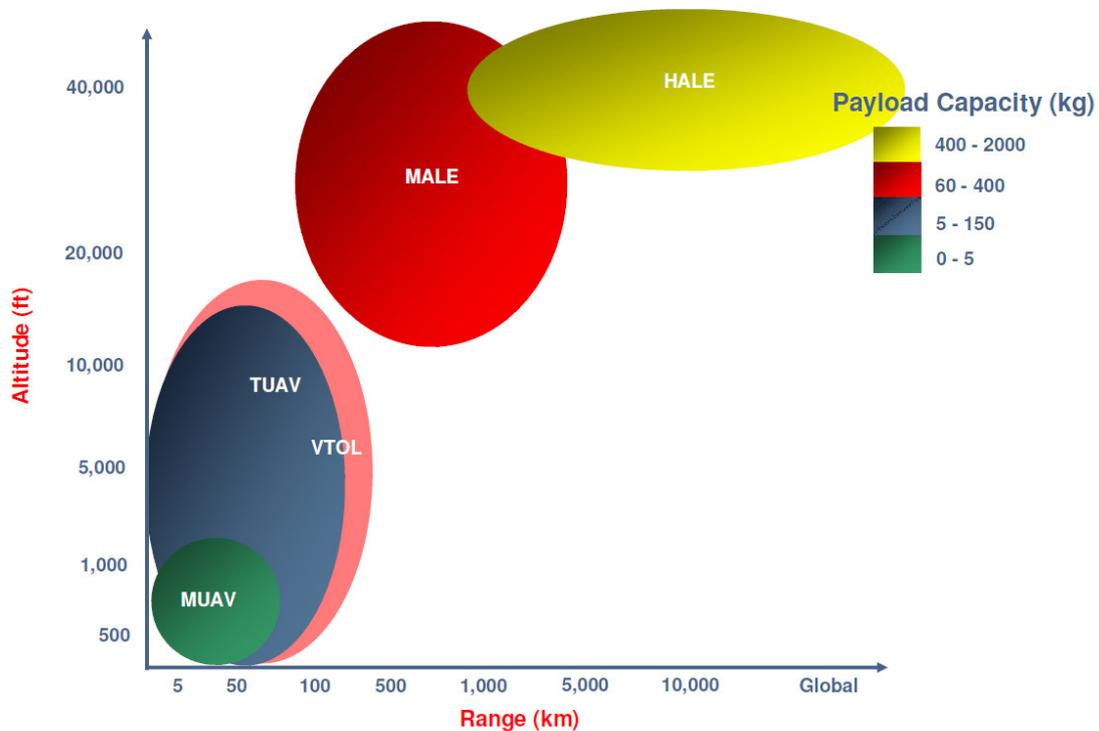


Figura 7 Clasificación de los UAV [10]

Otra posibilidad de clasificar los UAV es según el rango de la altitud de vuelo y de la capacidad de carga, Figura 7. Esta es una clasificación frecuentemente usada por el ejército. Según esta clasificación hay seis grupos de UAV, estos son: High Altitude Long Endurance-Unmanned Aerial Vehicle (HALE-UAV), Medium Altitude Long Endurance-Unmanned Aerial Vehicle (MALE-UAV), Tactical Unmanned Aerial Vehicle (TUAV), Mini Unmanned Aerial Vehicle (MUAV), Vertical Take-Off and Landing-Unmanned Aerial Vehicle (VTOL-UAV) y Micro Unmanned Aerial Vehicle (MAV).

Los UAV de tipo HALE tienen la capacidad de volar más de 32 horas y son utilizados para obtener información, extender la infraestructura de los satélites o substituirlos. Un ejemplo de este tipo de UAV es el Global Hawk de la empresa Northrop Grumman. Puede volar a una altura de 18.288 m y tiene un rango de más de 22 km. [11].

Los UAV de tipo MALE tienen una cobertura muy elevada; pero no tanto como los HALE y vuelan normalmente a menor altura. El campo de aplicación es el de la comunicación, además son capaces de volar en misiones de combate. Un UAV de este tipo es el Predator de la empresa General Atomics Aeronautical Systems con un posible tiempo de vuelo de 27 horas y una altura de 15 km. [12].

Otro tipo de UAV es el TUAV, que se utiliza para la vigilancia y reconocimiento aéreo. Un ejemplo de un vehículo de este tipo es el Camcopter S-100 de la empresa Schiebel. Este UAV tiene un rango de 200 km y puede transportar una carga de 34 kg. [13]

La clase de MUAV es la clase más pequeña existente y es en el sector en él que va a estar el UAV objeto de este trabajo. Un ejemplo de un UAV de este tipo es Mantis de la empresa Indra. Este UAV tiene un rango de 10 km y puede volar hasta 75 min.

2.2. Hardware /placa.

En general, se pueden distinguir dos categorías de hardware. Por un lado, están los dispositivos con sistema operativo Linux y, por otro lado, están los microcontroladores que utilizan el sistema operativo NuttX. Muchos de los microcontroladores pertenecen a la familia STM32 ARM. Además, se pueden diferenciar los sistemas con sistema operativo de Linux en las placas que son “aditivos” (capes) y que están “completos”. “Aditivo” significa que es una placa para un sistema que ya existe como “BeagleBoneblack” o “RaspberryPi” y la placa aditiva solo dispone de los sensores y componentes necesarios para poder controlar el vehículo. Estos “capes” son, por ejemplo, “Navio2” o “BBBMINI cape”. “Completo” significa que la placa ya tiene incorporados todos los componentes necesarios. Los modelos de estas placas son el “Erl-Brain2 autopilot”, la placa de “Snapdragon Flight Controller” y el BeagleBoneBlue. La ventaja de estas placas son el tamaño, porque es más compacto que el de las placas con cape. Otra posibilidad es utilizar una placa para el código de vuelo y además conectar una placa con un sistema operativo de Linux. La comunicación funciona con el protocolo de MAV Link vía una conexión de tipo serie como UART.

Nivel de la técnica

2.3. Software

El software empleado hace referencia a los UAV del sector de investigación, de consumo y del sector de economía, pero no del sector militar. El mercado del software es enorme y en general se puede diferenciar entre software comercial y software abierto. El sector de software abierto tiene la posibilidad de añadir y cambiar el código; lo cual permite amoldarlo a las necesidades de cada uno. Además, el hecho de ser gratuito es también algo importante. A continuación, se explica uno de los proyectos más importantes de tipo software abierto que hay actualmente y las placas que lo soportan.

AeroQuad es un proyecto de software y hardware con fuente abierta para controlar cuadricópteros. El software más novedoso apoya además otras configuraciones de volar como tri-, hex- y octocopter. Sin embargo, no es posible todavía volar con completa autonomía con este software. La única posibilidad que hay para controlarlo es vía control remoto. Todas las especificaciones se pueden ver en la tabla 2. El software AeroQuad cuyo soporte puede ser la placa AeroQuad 32 con el microprocesador STM32, o el microcontrolador Arduino (Mega 2560 or Uno). [14]

PX4 es una plataforma con software abierto que tiene el objetivo de ofrecer un software estándar de alto nivel. El proyecto ha sido empezado por el doctorando Lorenz Meier de la universidad ETH Zúrich. Es uno de los softwares más potentes que hay en la actualidad. [15] Con PX4 es posible activar desde un UAV de carrera hasta un UAV de carga. El software aporta distintos tipos de vehículos. Hasta ahora están incluidos los cópteros con una hélice, tres, cuatro, seis y ocho. Además, hay vehículos con alas y combinaciones de cópteros con alas, VTOL. El software de PX4 dispone además de funciones tales como modo de seguir, posibilidad de volver al lugar de inicio, despegue y aterrizaje automático. Hay tres posibilidades de controlar el PX4. La más básica sería mediante control remoto. Otra posibilidad es vía “QGroundControl”, se trata de un programa que puede estar en un portátil o un móvil. La última solución consiste en una conexión de datos de PX4 con un microcomputador externo. [16] El software PX4 trabaja en general con dos placas, Pixhawk y Snapdragon Flight. Se puede confirmar el éxito de este software ya que Intel con su placa Aero y Qualcomm con su placa Snapdragon Flight están utilizando ya el software PX4.

Tabla 2 Comparación de software

Nombre Software						
Ardu pilot	PX4	Aero Quad	Paparazzi UAV			
X	X	X	X	Quad	Coptero	Configuración
X	X	X	-	Tri		
X	X	X	X	Hex		
X	X	X	X	Octo		
X	X	-	X	Avion		Configuración
X	X	-	-	Coche		
X	X	-	-	VTOL		
X	X	X	X	OSD (On Screen Display)		Capacidades
X	X	X	X	Telemetría		
X	X	X	-	Estabilización camera (Gimbal)		
X	X	X	?	Gestión de Batería		
X	X	X	X	Aguantar altura vía barómetro		
X	X	X	X	Aguantar altura vía ultrasónica		
X	X	X	X	Aguantar curso magnetómetro /giro		
X	X	-	X	Aguantar curso GPS		
X	X	-	-	Modo de seguir		
X	X	-	-	Volver al inicio		
X	X	-	X	Misión planificaciones		
X	X	-	X	Despegue automático		
X	X	X	X	Aterrizar automático		
X	?	-	-	Vuelva si hay problemas (Fail safety)		

Ardupilot es el software más avanzado que existe. Puede ser empleado como soporte para casi todos los tipos de vehículos que hay como aviones, cópteros, barcos, vehículos terrestres y hasta submarinos. Además, el soporte Ardupilot, así como el PX4, puede ser utilizado para los aviones tipo VTOL. Al igual que PX4, Ardupilot tiene la posibilidad de ser controlado vía estaciones de tierra. Hay por lo menos diez programas distintos para el control de vehículos desde un portátil, móvil o tablet. Las diferencias entre ellos son los OS (Sistemas operativos) y obviamente sus aplicaciones. Algunas de estas estaciones de tierra son Mission Planner (para Windows o Mac) o AMP Planner 2.0 (mejor autopiloto para Mac Y Linux) y QGroundControl que son justo las únicas que se puede utilizar para Windows, Mac, Android e iOS. El software Ardupilot apoya un montón de placas como Pixhawk, Beagle Bone Blue, Erl-Brain, PXFmini, Navio2, Intel Aero y Qualcomm Snapdragon Flight Kit. [17]

Paparazzi UAV es un proyecto de tipo fuente abierta de software y también de hardware. El foco principal comenzó en los aviones; pero ahora también tienen un soporte de vehículos de tipo cópteros.

Nivel de la técnica

La conclusión es que los dos softwares más avanzados que hay actualmente en el mercado son el del proyecto PX4 y Ardupilot. Se puede decir que Ardupilot es un poco más avanzado que el proyecto de PX4. Por otro lado, el código de PX4 tiene otra ventaja como el apoyo de Intel y Qualcomm. Según Intel y Qualcomm PX4 tiene una arquitectura mejor. Además, la decisión del software depende de las placas soportadas. Ya se puede decir que solo tiene sentido la utilización de unos de estos dos softwares.

2.4. Funcionamiento de un cuadricóptero

El funcionamiento de un cuadricóptero se basa en la fuerza de empuje que generan cuatro hélices iguales. Según de la tercera ley de Newton “a toda acción le corresponde una reacción” en base a esta ley se diseña el sentido de giro de las hélices. Así, giran dos motores en el sentido del reloj y dos motores en sentido contrario. En la configuración de tipo H, elegida para la estructura del dron, los sentidos son los siguientes, Figura 7. En la Figura 8 se pueden ver las cuatro fuerzas que producen los motores, la velocidad angular de los motores, los ángulos del sistema de referencia del coptero y los momentos que producen dichas fuerzas.

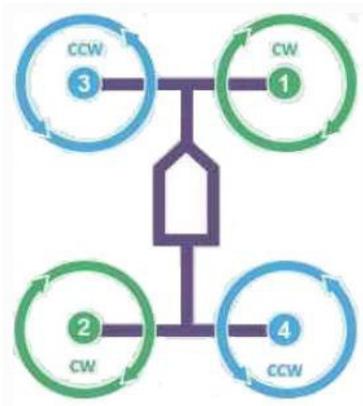


Figura 8 Sentimientos de giro

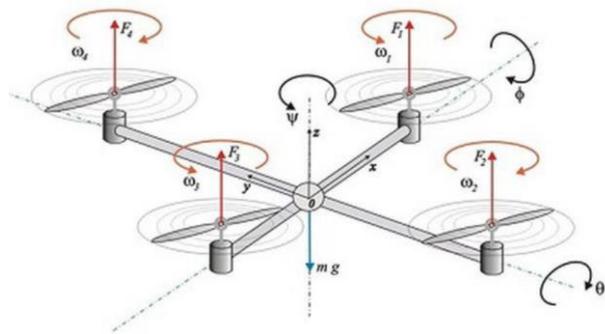


Figura 9 Fuerzas del dron

Para que flote se deben cumplir cuatro condiciones, que son los siguientes.

$$\sum_{i=1}^4 F_i = m * g \quad (1)$$

$$F_{1,2,3,4} \parallel g \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^4 M_i = M_i = 0 \quad (3)$$

$$(w_1 + w_3) - (w_2 + w_4) = 0 \quad (4)$$

Si se desea que el vehículo realice un movimiento vertical (throttling) la fuerza de los motores y el peso del dron no pueden estar en equilibrio; de esto se deducen los estados siguientes:

$$\sum_{i=1}^4 F_i \neq m * g \quad (5)$$

$$F_{1,2,3,4} \parallel g \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^4 M_i = M_i = 0 \quad (7)$$

$$(w_1 + w_3) - (w_2 + w_4) = 0 \quad (8)$$

Para que se produzca un giro alrededor del eje vertical (yaw) del dron, debe existir un momento resultante distinto de cero; es decir, que la suma de las velocidades de los motores no ha de ser nula para que gire el vehículo.

$$\sum_{i=1}^4 F_i = m * g \quad (9)$$

$$F_{1,2,3,4} \parallel g \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^4 M_i = M_i = 0 \quad (11)$$

$$(w_1 + w_3) - (w_2 + w_4) \neq 0 \quad (12)$$

Si el vehículo debe hacer una rotación al lado (roll) o hacia adelante (pitch) hay que considerar el ángulo de inclinación del plano del dron respecto del suelo. La fuerza total para elevar el dron tiene que estar en equilibrio con el peso del dron. Así dependiendo del ángulo, F_l (componente vertical) es solo la parte $\cos(\alpha)$ de la fuerza completa F_c .

$$F_l = F_c * \cos\alpha = m * g \quad (13)$$

$$F_{1,2,3,4} \text{ no paralelo a } g \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^4 M_i \neq M_i = 0 \quad (15)$$

$$(w_1 + w_3) - (w_2 + w_4) \neq 0 \quad (16)$$

Nivel de la técnica

3. DESARROLLO/ PUESTA EN MARCHA

La fase de desarrollo hace referencia a todo el procedimiento y los pasos en detalle para elegir los componentes del UAV y finalmente realizar la puesta en marcha. Está subdividido entre las fases de dimensionamiento general, desarrollo del circuito electrónico, diseño de la estructura mecánica y el soporte lógico.

3.1. Dimensionamiento general

El modo de proceder para dimensionar todos los componentes es el siguiente. El primer paso es hacer una lista de requerimientos del vehículo no tripulado y sujetar todos los aspectos importantes, Tabla 3 y Tabla 4. Esa tabla surge de las condiciones del proyecto. A partir de estos requerimientos y en este contexto se diseñan las siguientes etapas. Las tablas de requerimientos están divididas en dos partes, la parte mecánica y la parte eléctrica.

Los requerimientos mecánicos más importantes son el peso de la carga y del vehículo, y la posibilidad de fabricar el mayor número de componentes posible con una impresora 3D. El vehículo debe transportar una carga mínima de 500 gramos y no debe tener un peso total superior a 2500 gramos. Este valor tiene que ser comparado con las leyes de España y Europa, ya que, en Alemania, por ejemplo, solo se puede volar un UAV con un peso superior a 2kg con una licencia especial. En cambio, en España está dentro de las leyes. La normativa completa se puede leer en el apartado 4.1 Disposiciones legales/Normativas.

Los requerimientos principales de la parte eléctrica son el tiempo de vuelo y el rendimiento del computador/Microcontrolador. El objetivo del tiempo en el aire es de por lo menos de 20 minutos de flotabilidad. Los motores, hélices y el acumulador están condicionados a esta demanda. La selección de estas piezas está escrita en la parte electrónica. Los requerimientos además se pueden entender con las dos tablas siguientes.

Tabla 3 Requerimientos mecánicos

Requerimientos mecánicos				
Geometría	Numero	Unidad	Descripción	Demanda Deseo
Número hélices	4	-	Con posibilidad de ampliación a 8 hélices en forma coaxial	dem.
Longitud	50	mm	Tamaño máximo sin hélices	dem.
Anchura	50	mm	Tamaño máximo sin hélices	dem.
Altura	25	mm	Tamaño máximo	dem.
Posibilidad de doblar/ desmontar	-	-	Los brazos donde van colocados los motores deben que tener la posibilidad	dem.

Desarrollo/ Puesta en marcha

			de doblarse/desmontarse para facilitar el transporte	
Flexibilidad	-	-	Posibilidad de añadir o desmontar con facilidad nuevos sensores y cargas	dem.
Posición de carga	-	-	Debe ser posible posicionar la carga en el centro abajo del dron tal como en la parte trasero y frontal	dem.
<i>Cinética</i>				
Velocidad	10	m/s		dem.
Relación empuje peso	2/1		Relación mínima	dem.
<i>Fuerzas</i>				
Peso máximo	2,5	Kg	El UAV con carga	dem.
Peso carga	0,5	Kg	El peso de carga	dem.
<i>Seguridad</i>				
Protección contra golpes	-	-	Protección mecánica para las hélices que permita la posibilidad de volar cerca de obstáculos	des.
<i>Fabricación</i>				
Cuerpo	-	-	La mayoría de las piezas del cuerpo y de las conexiones deben ser fabricadas con una impresora 3D	dem.
<i>Costes</i>				
Parte mecánica total	100	€		dem.
<i>Fechas</i>				
Desarrollo	-	-	Finalización del desarrollo el 07/04/2017	dem.
Fabricación	-	-	Finalización de la fabricación hasta el 31/05/ 2017	dem.

Tabla 4 Requerimientos eléctricos

Requerimientos eléctricos				
Placa principal	Numero	Unidad	Descripción	
Sistema operativo	-	-	La placa principal debe de funcionar con Linux	dem.
Sensor GPS	-	-	Poder utilizar GPS	dem.
Sensor barómetro	-	-	Posibilidad de utilizar barómetro	dem.
Posibilidad de ampliación	-	-	Conexiones para poder añadir y conectar más sensores en un futuro tales como I2C, ADC	dem.
Ergonomía				
Mando vía Portátil/ Móvil	-	-		des.
Mando vía control remoto	-	-		dem.
Tiempo de flotabilidad	20	min		dem.
Tiempo de vuelo	15	min		des.
Costes				
Parte eléctrica total	600	€		dem.
Términos				
Pedido de componentes			Finalización del desarrollo el 10/03/2017	dem.

3.2. Subsistema Electrónico

La parte electrónica incluye todo la selección y el dimensionamiento de las piezas electrónicas. Además, contiene el conocimiento más fundamental de los componentes utilizado. En total hay tres partes, la placa principal, los esquemas eléctricos, y el dimensionamiento de propulsión.

3.2.1. PLACA PRINCIPAL Y SENSORES

La placa utilizada al final es la placa BeagleBoneBlue. La decisión depende de los requerimientos de la placa. Por un lado, tiene que ser una placa con sistema operativo Linux además es recomendable utilizar una placa con memoria flash porque no se puede confiar en las tarjetas SD utilizadas en los de RaspberryPi. Aquí se pueden leer muchos problemas con sistemas operativos fallando por culpa de una conexión mala entre la tarjeta y la placa. Así,

Desarrollo/ Puesta en marcha

según la profundidad de investigación del nivel de la técnica hay tres placas que se podrían utilizar, el snapdragonflight, el BBBlack con una capa y el BBBlue. El precio de la placa Snapdragonflight es de 400\$, el precio del BBBlue es de 80€. El precio del BBBlack con la capa tiene un precio parecido al BBBlue pero tiene la desventaja de que todas las piezas no están unidas en una placa. Así considerando el precio y el tamaño, la mejor decisión es utilizar la placa BBBlue, Figura 10.

La decisión de la placa BBBlue va también con la decisión del software. Como hasta ahora solo hay un apoyo desde del software de Ardupilot para esta placa, Ardupilot va a ser el software utilizado.

La placa tiene ya incluido, un acelerómetro, girómetro, magnetómetro y barómetro. El sensor GPS esta aparte y se tiene que conectar a la placa.

El sistema NAVSTAR GPS (NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System) fue desarrollado en los años 1970 de los Estados Unidos y es uno de los sistemas que existen para hacer posicionamiento en la tierra. A partir de mayo del 2000 el GPS ha sido libre para el mercado civil y tiene ahora una exactitud aproximada de 5 m, con el uso de una frecuencia. Este valor depende de muchos aspectos como el tipo de receptor, reflexión de señales y números de utilización de frecuencias. [18] El receptor utilizado para el GPS, es el chip Neo-6M-0-001 de la empresa ublox con un “Breakout Board”. La placa funciona de 3 a 5 V. La conexión con la placa se realiza con UART. Los mensajes son del protocolo NMEA (National Marine Electronics Association) y son de tipo “string”. El “string” contiene los dos valores en términos de latitud y longitud. [19] Para su uso práctico, es importante posicionar la antena lo más lejos posibles del resto de componentes electrónicos y de otros receptores de radio.

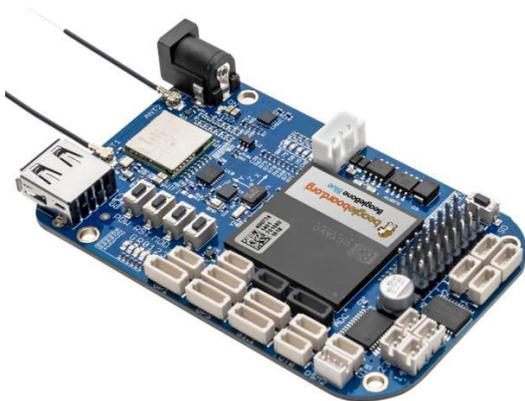


Figura 10 BeagleBoneBlue [20]

- Octavo Systems OSD3358 1Ghz ARM Cortex-A8
- 512MB DDR3 RAM
- 4GB 8-bit eMMC flash Memory
- Wlan y Bluetooth 4.1
- 9-ejes IMU, barometer
- Interfaz para GPS, DSM2 radio, UART, SPI y I2C

El barómetro utilizado en la placa de BBBlue es el BMP280 de Bosch y está basado en el principio de los cristales piezoeléctricos. Estos cristales tienen la propiedad de generar un voltaje cuando están sometidos a una presión. El dispositivo de evaluación calcula, con este valor, la altura. En la práctica es recomendable poner algo encima del sensor, como espuma plástica y/o poner la placa en una caja. Así se puede evitar radiación solar y diferencias de presión que no resulten de un cambio de altura.

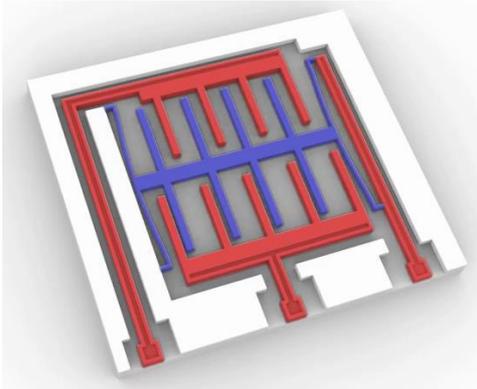


Figura 11 Principio del funcionamiento del acelerómetro de Bosch

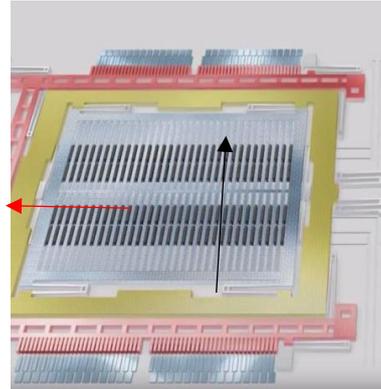


Figura 12 Principio del funcionamiento del girómetro de Bosch

El sensor de tipo MEMS (Micro-Electro-Mecanical System) que está montado en la placa BeagleBoneBlue es el MPU-9250 de la marca TDK. El sensor tiene un acelerómetro (aceleraciones), un giroscopio (velocidad angular) y un magnetómetro (orientación).

El funcionamiento del acelerómetro es el mismo que en los sensores de Bosch, Figura 11. Aquí se puede ver una estructura como un peine. El peine tiene tres partes, dos de ellas están fijas (rojas) y la otra parte se puede mover dependiendo de la aceleración (azul). Si la distancia entre los peines cambia, cambia también el valor capacitivo. Esta es la parte mecánica del sensor y aparte hay una unidad para evaluar los valores medidos. Otro tipo de acelerómetro es el de la empresa MEMSIC, que utiliza gas con moléculas calentadas para detectar las aceleraciones. Aquí solo tiene una mención, porque tiene la ventaja según el fabricante de tener una inmunidad frente a oscilaciones. [21] Eso es muy importante para los UAV puesto que no se pueden evitar las vibraciones que ocurren por culpa de los motores y las hélices. Es importante para la parte práctica intentar tener el menor número de oscilaciones posibles. Esto se puede conseguir con un soporte bastante rígido, hélices bien equilibrados y un soporte para la placa que disminuya las vibraciones. Para medir la velocidad angular hay diferentes posibilidades y giroscopios basados en líquidos, ópticos y vibraciones. Los sensores más comunes en robótica y en concreto en los UAV, son los que funcionan con vibraciones, tal como lo del BeagleBoneBlue. Como en los sensores de aceleración hay una masa o estructura como un peine que oscila. En la Figura 12, la estructura roja y verde oscilan en dirección de la flecha roja y la parte azul se queda fija en el centro. Si tiene lugar una rotación la parte azul empieza a oscilar también en dirección de la flecha roja. Esta oscilación se puede medir con un cambio de la capacidad entre las estructuras del peine. Este funcionamiento está basado en la fuerza coriolis. El tercer sensor es el magnetómetro, se ha utilizado uno que está basado en el principio del Efecto Hall.

Desarrollo/ Puesta en marcha

3.2.2. ESQUEMA ELÉCTRICO

En la Figura 13, se pueden ver todas las conexiones del circuito eléctrico. Los reguladores están conectados por un lado con el motor trifásico. Los cables se pueden conectar en general de cualquier manera. Para invertir el sentido de giro del motor se han de intercambiar dos cables. Los reguladores están conectados con la batería y con la placa. Para la alimentación de la placa se necesita un convertidor DC/DC. A la entrada de la placa se puede conectar un voltaje entre 9 y 18V. Para realizar esto se utiliza una placa con el chip LM2596 de Texas Instruments, Figura 15. El voltaje de entrada puede ser entre 4 V y 35 V y de salida 1,23 a 30 V, con una corriente máxima de 3 A. Con un potenciómetro se puede cambiar el voltaje de la salida que está puesto al final a un valor de 12 V. Para encender la placa hay un interruptor en el cable positivo después del convertidor.

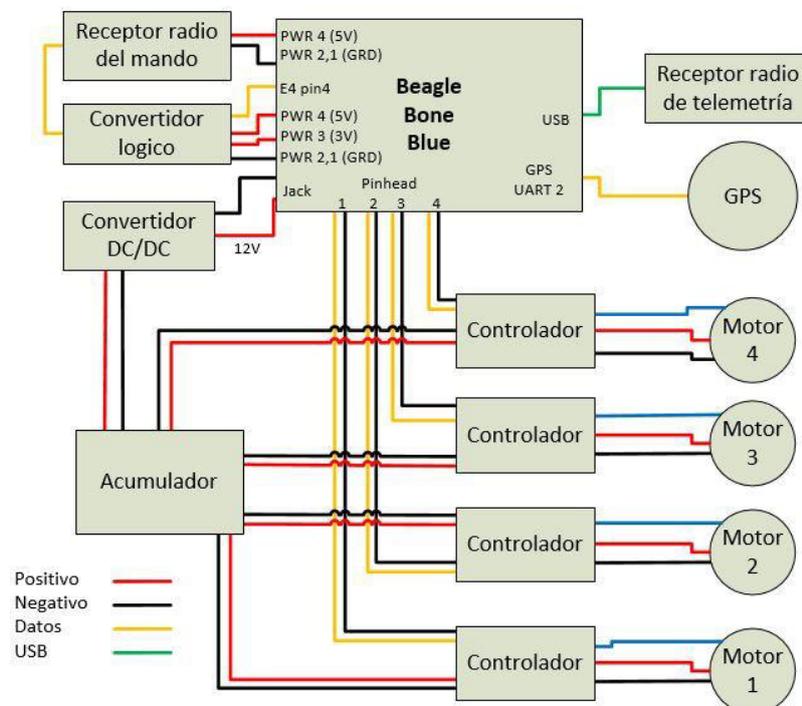


Figura 13 Esquema eléctrico

En general, se tiene que tener cuidado con todas las señales que se conectan con la placa porque las entradas del BeagleBoneblue solo pueden 3,3 V y el voltaje máximo son 3,6 V. Para proteger el chip para todas las señales que tienen un valor más alto que 3,3 V se necesita un convertidor lógico o se tiene que mirar el voltaje máximo de la señal con un osciloscopio para asegurar que la señal no excede el valor máximo. Por eso, el receptor del mando está conectado con un convertidor lógico. El convertidor consta de un mosfet y dos resistencias para cada canal, y necesita dos voltajes entre que se tiene que intercambiar y además tiene un pin para la entrada de la señal y uno para la señal de salida. En la Figura 14, se puede ver el convertidor utilizado con sus cuatro canales. Por otro lado, el GPS que también está funcionando con 5 V no necesita un convertidor porque la señal tiene un voltaje máximo de 3,4 V.

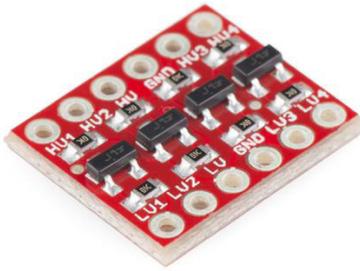


Figura 14 Logic Level Shifter de Sparkfun



Figura 15 DC-DC convertidor

El receptor radio de telemetría está conectado vía USB y para el GPS hay un conector especial que es el UART 2.

La telemetría utilizada es un sistema de radio de Holybro basado el sistema de 3DR. El sistema funciona con una frecuencia de 433Mhz y tiene un alcance de 300 metros, Figura 16.



Figura 16 Módulo de radio

3.2.3. DIMENSIONAMIENTO DE LA PROPULSIÓN

El dimensionamiento de la propulsión está condicionado por muchos aspectos. La impulsión se divide en cuatro partes, que son: los motores, las hélices, los reguladores y el acumulador. En esta fase se elegirán los componentes y los aspectos más importantes para desarrollar un buen dimensionamiento. El objetivo principal es conseguir componentes lo más ligeros posible y tener además suficiente empuje conforme a los requerimientos. La clave para ello es una sintonización buena y construir y utilizar componentes ligeros.

Las hélices se caracterizan por tener dos valores característicos, el diámetro y la rampa. Estos dos parámetros generalmente se miden en pulgadas. La rampa se puede comparar con la rampa de un tornillo. El valor indicado es la distancia de la hélice que gira teóricamente con una rotación en un medio sólido. Según la teoría de las hélices se puede decir que, a mayor tamaño de la hélice, mayor será su rendimiento, lo que se traduce en un mayor tiempo de vuelo. La razón de esto es que para tener un cambio de impulso es siempre más eficiente acelerar una masa grande despacio, que acelerar una masa pequeña rápido. Por esto, es mejor elegir un motor con mayor par y menor velocidad, para que se pueda utilizar una hélice más grande. Por tanto, el tamaño del soporte dependerá del tipo de motor y hélice seleccionados. Por otro lado, la rampa tiene una influencia grande para determinar la velocidad máxima. Lo mejor es orientar

Desarrollo/ Puesta en marcha

las hélices siguiendo las recomendaciones del fabricante. El tipo de motor y hélice se elegirán según esos requerimientos. [22]

En el sector de los modelos de UAVs se utilizan casi exclusivamente motores del tipo sin escobillas. En inglés, se llaman “Brushless Motor” y son en principio motores síncronos. En español, la palabra más oficial es motor de corriente continua conmutada de forma



Figura 17 Motor sin escobillas con los imanes exterior [13]

electrónica. La diferencia de estos con las máquinas síncronas es el estator, que se sustituye el bobinado por imanes permanentes. Esta cualidad tiene algunas ventajas como por ejemplo menor peso, porque no hay necesidad de poner un inductor, ni una fuente de tensión de excitación y escobillas. Además, al no tener escobillas tiene la ventaja de no tener chispas y casi no tener mantenimiento. [23] Hay dos configuraciones principales de estos motores. Los imanes constituyen el rotor y las bobinas son el estator. Hay dos tipos de construcciones, una con las bobinas en el interior y los imanes rotores montados en un casquete exterior, la cual es la de los motores más comunes, Figura 17; o con los imanes fijados directamente en el rotor y las bobinas en el exterior. La diferencia entre si los imanes están en la ola, o montados en el casquete está en el número de imanes que se puede montar y por tanto también el tamaño. Por lo menos se necesitan dos imanes y en general siempre terminales pares. La diferencia es que los motores con menor número de terminales, comparado con motores con mayor número de imanes, tienen una velocidad mayor y un par menor si la circunvolución es la misma. Por eso es preferible un motor con los imanes en el exterior para tener mayor par y menor velocidad. Las bobinas son siempre múltiplos de tres. Si hay más de tres ranuras, las bobinas están divididas; lo que ocurre entonces, es que cuantos más imanes y ranuras, el campo giratorio de las bobinas es mayor que en el rotor. El resultado es una reducción eléctrica parecida a un engranaje mecánico. Dicho resultado es más par y con menor velocidad que es lo más importante para girar una hélice grande y tener un rendimiento alto.

Por tanto, los motores no son compatibles con cualquier hélice. El motor y la hélice tienen que ser elegidos cuidadosamente y al mismo tiempo. Si la hélice es demasiado pequeña las consecuencias para el motor no son muy graves, el resultado es solo que tendrá menor empuje. Pero si la hélice es demasiado grande en el tamaño o en la rampa habrá pérdidas que se traducirán en el calentamiento del motor. Con más calor el cobre conduce peor y como consecuencia el rendimiento de los imanes será peor. Si las temperaturas llegan a alcanzar más de 65° C, llegarán a un nivel crítico que debe ser evitado para no causar daños consistentes en el motor. Por ello, los motores necesitan estar frescos con una buena ventilación y se tiene que

hacer pruebas con la hélice y el acumulador elegido. Los datos de los motores facilitados por el fabricante normalmente son por lo menos el tamaño, el peso, los posibles voltajes, la corriente máxima, la resistencia y el valor característico KV.

El valor KV indica la velocidad que el motor puede alcanzar dependiendo del voltaje. Además, en muchos casos también hay propuestas para las hélices y especialmente en el sector de los UAV los valores de empuje y de la corriente dependiente.

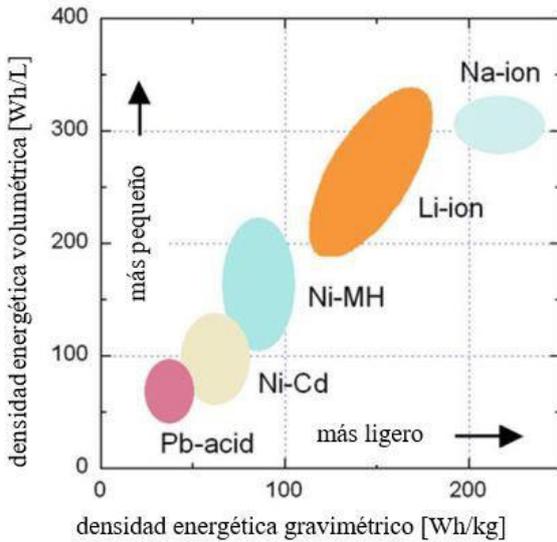


Figura 18 Tipos baterías [24]

Estos valores son muy importantes para calcular los dimensionamientos de los motores. Un buen punto de referencia para la relación entre el empuje y el peso sería una relación de 2/1 para tener un comportamiento satisfactorio. [25]

Los requerimientos que precisa una batería son múltiples. En general una batería tiene que poner a disposición suficiente voltaje y corriente según la aplicación. Además, hay otros valores característicos como, los índices de velocidad de descarga, los posibles ciclos de recarga/ durabilidad, carga rápida y auto descarga. Pero especialmente en lo que se refiere a los UAV el aspecto más importante es el de la densidad energética gravimétrica. En la Figura 18, se puede ver los modelos de baterías más comunes que hay actualmente y la relación entre la densidad energética gravimétrica y volumétrica. Las baterías de ión litio, o en general las baterías de litio son la tecnología más avanzada que hay actualmente. Además, hay baterías de tipo ion sodio-ión que puede ser una alternativa en el futuro. Sin embargo, todavía están en fase de desarrollo e investigación. [26] Hay tres tipos de baterías de tipo litio que se deben mencionar, las de ión litio, Li-polimérico y LiFe. La batería de litio polimérico es un nuevo desarrollo de la batería ion litio. La diferencia entre la batería de litio polimérico con otros tipos de baterías de ion litio es que en éstas no hay electrolitos líquidos, sino sólido. [24] Por eso, existe la posibilidad de hacer baterías con formas diversa; siendo esto una de las ventajas de este tipo de batería. Otra ventaja, es una densidad energética/gravimétrica y un voltaje mayor que en las baterías de tipo litio y LiFe. Los voltajes de una celda para las tres baterías son 3,7 V para litio polimérico, 3,6 V para ión litio y 3,2 V para LiFe. Por otro lado, la ventaja de las baterías de ion litio y LiFe tienen una robustez más elevada que las de litio polimérico. Así para

Desarrollo/ Puesta en marcha

Llegar a un tiempo de vuelo lo más grande posible la batería de tipo litio polimérico es la batería utilizada.

Respecto al tratamiento, hay dos factores importantes a tener en cuenta al elegir las baterías de tipo litio polimérico. Estos son la temperatura de la batería y el voltaje. El voltaje puede llegar a valer 3,6 V y alcanzar un voltaje de hasta 4,2 V una vez cargado. La tensión mínima de descarga disminuye por debajo de 3,5 V habrá daños irreversibles, tales como pérdida de capacidad y auto descarga. Por otro lado, si la tensión supera 4,2 V podría llegar a inflamarse. [27] Habrá que utilizar un cargador especial para este tipo de batería e investigar bien el tiempo de vuelo, o instalar un aparato para medir el voltaje.

El regulador será un inversor trifásico que se encarga de cambiar el voltaje de forma continua a forma alterna, Figura 19. El bobinado del motor puede estar conectado de tipo estrella o en triángulo. Los datos característicos son las celdas que se puede utilizar y la corriente máxima. Además, puede ser importante que el regulador tenga el sistema BEC (Battery Eliminator Circuit). Ese sistema es útil para algunas aplicaciones porque incluye un DC/DC

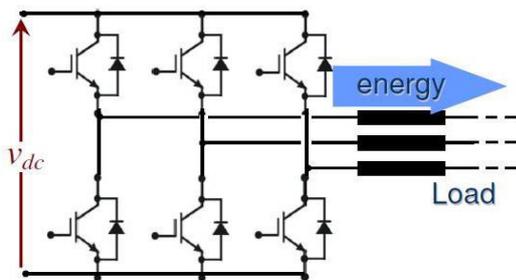


Figura 19 Inversor trifásico [44]

convertidor del voltaje conectado a 5 V. Eso es necesario para alimentar los servomotores con corriente. Los reguladores no industriales no están construidos para una marcha continua. El valor característico de la corriente indica teóricamente la carga continua. La carga continua significa para un regulador del sector del modelismo una carga para aproximadamente tres o cuatro minutos. Por eso, dependiendo del dimensionamiento de los motores y la carga, se tienen que elegir los reguladores con mayores valores característicos. Un punto de referencia que puede ser nombrado sería el empleado por la empresa Hacker donde los reguladores deben tener un valor característico de corriente máxima del 20-25% más grande para usos duros. [25] Además, hay reguladores especialmente para vehículos no tripulado que tienen un tiempo de reacción menor y también son más robustos.

En resumen, para elegir la propulsión hay que tener en cuenta todos los aspectos arriba mencionados. Inicialmente, la característica más importante será conocer el peso máximo del UAV, el cual no está definido inicialmente; puesto que los componentes no se han elegido todavía o no se puede saber su peso. Por lo que se tiene que hacer una estimación del peso. La Tabla 5 muestra el peso de cada uno de los componentes del UAV. Una vez elegida la placa y estimado el peso del soporte faltarían solo los componentes electrónicos y ya se podría trabajar con estos valores.

Tabla 5 Peso componentes

<i>Componentes</i>	<i>Peso [g]</i>	<i>Números</i>	<i>Peso total [g]</i>
<i>Electrónica</i>			
<i>BeagleBoneblue</i>	45	1	45
<i>Power module</i>	20	1	20
<i>Acumulador</i>	850	1	850
<i>Motor</i>	106	4	424
<i>Recibidor mando</i>	20	1	20
<i>Telemetría</i>	13	1	13
<i>GPS</i>	20	1	20
<i>Regulador motor</i>	19	4	76
<i>Mecánica</i>			
<i>Hélice</i>	8,9	4	35,6
<i>Soporte</i>	450	1	450
<i>Carga</i>	500	1	500
<i>Total</i>			2453,6

Para hacer cálculos el peso del UAV se estima como máximo en 2500 gramos. Los cálculos se han hecho con el programa eCalc. Es un programa online con una biblioteca de motores, baterías, reguladores y hélices suficientemente grande. En el programa se introducen los parámetros del modelo y del subsistema electrónico; y el programa calcula los tres valores más importantes tales como el tiempo de vuelo estacionario, la corriente máxima de un motor y la relación entre empuje y peso, Tabla 6.

Se pueden comparar diferentes motores con diferentes voltajes y hélices para conseguir un tiempo de vuelo lo más grande posible con el empuje querido. El procedimiento es elegir un motor y hacer cálculos con diferentes hélices y voltajes sin pasar la corriente máxima del motor. Como está escrito en los requerimientos, el objetivo para este UAV es una relación entre el empuje y peso de por lo menos de 2/1 y un tiempo de vuelo de 15 minutos. Una vez elegidos el motor, las celdas de batería y una hélice, el paso siguiente es elegir un regulador que funcione con el voltaje requerido y con suficiente amperaje. La Tabla 7 muestra los componentes definitivos elegidos.

Desarrollo/ Puesta en marcha

Tabla 6 Valores característicos propulsión

Valores característicos	
Corriente max un motor	11,96 A
Tiempo de vuelo estacionario	22,3 min
Empuje-Peso	2,2:1

Tabla 7 Componentes elegidos

Componentes	Nombre	Spec.
Motor	SunnySky V3508 KV380	0,28 Ω 106 g 380 KV
Hélice	GEMFAN F05307	14/4.7
Regulador	Favourite LITTLE BEE	30 A
Acumulador	Gens Tattu (lipo)	22,2 V 6000 mAh

Además de los valores de la Tabla 6 se pueden hallar otros parámetros importantes como son el peso de todos los componentes o la velocidad máxima. Todos los resultados del programa Ecalc junto con los componentes elegidos se pueden encontrar en el anexo. Para evaluar los valores del programa (Tabla 6) se tiene que mirar en las fichas de datos del motor, que se puede encontrar en el anexo. Aquí se puede leer que un motor con una hélice 14/4.7 y un voltaje de 22.2 V tiene un empuje de 15,7 N y un corriente de 12 A. Con eso se puede calcular la relación del empuje con el peso, fórmula (17), (18).

$$n_{\text{motores}} * F = 4 * 15,7N = 62,8N \quad (17)$$

$$\frac{62,8N}{25N} = 2,5 \quad (18)$$

En ese caso, el valor calculado es más grande que el valor del programa. Al final se puede confiar más en el valor calculado manualmente porque los valores utilizados resultan de pruebas de la empresa y no son calculados, como en el programa eCalc. Al final un valor más preciso solo se puede mostrar con pruebas. La fórmula (19) muestra la corriente máxima para elegir un regulador con el factor de seguridad para usos duros como en un UAV. Se podría utilizar un regulador de 20 A, pero como se utiliza una batería con 6 celdas, casi todos los reguladores tienen una carga máxima de corriente más grande. Así el regulador elegido tiene 30 A.

$$I_{max} + I_{25\%} = 15 A + 3,75 A = 18,75 A \quad (19)$$

Finalmente, falta determinar el tamaño de la batería. Las celdas son fijas porque dependen de la elección del motor y de la hélice y solo se tienen que elegir según la capacidad. Una capacidad más elevada permite teóricamente un tiempo de vuelo mayor; pero también supone un peso mayor. Por eso, hay un punto donde una batería más grande no serviría para obtener un tiempo de vuelo mayor. Además, hay límites en el peso del UAV. Por eso, hay que encontrar un punto medio entre el tamaño de la batería y el peso del UAV para así obtener las mejores características. El tiempo de flotabilidad es de 22,3 min. Este valor está verificado en la fórmula siguientes. No se puede utilizar toda la capacidad de la batería, un porcentaje de 85% es fiable y protege la integridad de la batería. El UAV pesa 2,5 kg eso significa que cada motor tiene que disponer 6,25 N. Lo que se traduce en que para desarrollar esa fuerza un motor necesita 3 A. El valor calculado está cerca del valor simulado por el programa Ecalc. Este valor es un poco mayor porque por un lado falta añadir el valor del consumo de la placa y por otro lado debido el control y diferentes velocidades del motor la corriente de los motores es algunas veces un poco más elevado.

$$\frac{Q}{I_{max} * n_{motores}} * 60 = \frac{5,1Ah}{3 A * 4} * 60min = 25min \quad (20)$$

3.3. Subsistema Mecánico

Para desarrollar la parte mecánica, hay que empezar por hacer una investigación en detalle del mercado de los UAV con cuatro hélices, especialmente de los UAV impresos con impresoras 3D. Las posibles opciones para imprimir cada una de las piezas del UAV están limitadas a impresoras de tipo filamento, las cuales están disponibles para este proyecto. El tipo de impresora empleado influirá en la estabilidad del UAV, así como en el diseño.

El tamaño del soporte depende del diámetro de las hélices y de la distancia entre ellas. En este caso, las hélices tienen un diámetro de 14 pulgadas lo que equivale a 355,6 mm. Para tener un indicio sobre el valor de la distancia entre las hélices se puede tomar como referencia al UAV DJI Inspire1 que tiene una distancia aproximadamente de 8 cm. Está fabricado por la empresa más conocida, y tiene un tamaño conocido que es similar al que buscamos. Se puede decir que al final se busca conseguir un término medio entre una distancia suficientemente grande como para tener menor pérdida de flujo (prop wash) y una distancia suficientemente pequeña para conseguir el menor peso total posible. Con esos dos valores el tamaño del UAV está definido en 450 mm en ambas direcciones. A continuación, la tarea del soporte es conectar los cuatro motores con una rigidez suficientemente elevada y sin un peso mayor que el límite permitido que son 450 gramos.

Para encontrar una solución a la hora de realizar el soporte se utiliza una tabla morfológica como método de investigación, Tabla 8. La tabla morfológica permite tener una visión conjunta y más clara de todas las alternativas posibles. Esta tabla o sistema completo se divide en sistemas parciales. De este modo, se puede investigar cada sistema parcial de forma individual e independiente del sistema completo. A continuación, se ponen todas las soluciones

Desarrollo/ Puesta en marcha

encontradas en la misma línea para formar así una matriz que contenga todas las posibles soluciones. De esta manera, se elige una o varias combinaciones de soluciones y se comparan en conjunto para encontrar la mejor alternativa de todas.

En la primera columna de la Tabla 8 se listan todas las funciones parciales, así como la ordenación de los motores, el material de la estructura principal, la forma de la estructura principal, el tipo de soporte de aterrizar, la forma de doblaje, la orientación de los motores y el tipo de motor.

Las columnas siguientes continúan con la explicación de las posibles soluciones. En color azul se pueden ver las opciones elegidas.

La ordenación de motores y brazos es una de las partes que más influye en la estabilidad, en el espacio para montar componentes y en el aspecto físico. Para obtener la flexibilidad buscada, la decisión es ordenar los brazos del UAV en forma de H, en lugar de en forma X, pudiendo así poner los sensores y las cargas sobre ellos. De esta forma, se obtiene en el centro más espacio y flexibilidad para poner cargas. Las desventajas que aparecen al compararla con una ordenación en forma de X o + están de una estabilidad a torsión menor, Figura 30. La ordenación V es una versión de la ordenación X o + para UAV con cámaras. Este modelo tiene la ventaja de no tener las hélices en la vista de la cámara.

Tabla 8 Tabla morfológico

Funciones parciales	Posibles soluciones			
	1	2	3	4
Ordenación de motores y brazos	formación H 	formación X 	formación + 	Formación V 
Material de la estructura principal	carbono	estructura imprimida en 3D	aluminio	madera
Forma de la estructura principal	perfiles 	platos 	estructura completa 	estructura compleja 
Tipo de soporte de aterrizar	ninguno 	Tipo central 	Tipo al final de los brazos 	-
Forma de doblaje para transportar	faltar los brazos	Desmontar los brazos	un sistema entero	-

Orientación de los motores	arriba	abajo	Con ángulo 	-
	Motor	eléctrica	gasolina	turbina

Una vez realizados los estudios y las comparaciones necesarias y teniendo en cuenta algunas condiciones del proyecto, tales como un bajo coste en materiales y una alta estabilidad, se puede así determinar cómo hacer el prototipo. Para ahorrar costes y tiempo se imprimirán el mayor número de piezas posibles con una impresora 3D y para ganar estabilidad se hará el soporte con perfiles de material compuesto (composites). Imprimir solo las piezas más complejas con una impresora 3D tiene la ventaja de ser una construcción simple y ligera. Un diseño del soporte totalmente imprimible con una impresora 3D, sería mucho más complejo, más pesado y de menos rigidez. Además, el tiempo de producción sería más grande ya que depende del tamaño y del relleno. Por eso, la mejor solución es utilizar perfiles de material compuesto que puedan absorber las fuerzas e imprimir solo las piezas pequeñas. El material compuesto es la primera opción, porque tiene la mejor relación entre peso y resistencia. Por otro lado, los perfiles son la mejor opción, porque tienen una rigidez mayor que los platos, especialmente son mejores por el uso de los brazos.

Para construir el soporte para aterrizar hay tres opciones. La solución más fácil es no tener soporte para aterrizar y utilizar el soporte ya existente. Eso tiene la desventaja de tener un riesgo elevado de tocar el suelo con las hélices durante el aterrizaje. Además, no se podría montar una carga debajo del soporte. Tal y como está escrito en las condiciones existe la posibilidad de extender el vehículo de 4 hélices a 8 de tipo coaxial, solo estaría la opción de utilizar un soporte con aterrizaje centralizado.

Uno de los requisitos del UAV es hacerlo lo más pequeño para poder transportarlo con facilidad. La opción más factible sería que existiera la posibilidad de desmontar los tubos que hay que conectar. En cambio, emplear una estructura capaz de doblarse tendría menor estabilidad frente a oscilaciones. Por ello, esta segunda opción no va a ser utilizada.

La orientación de las hélices está colocada en prácticamente todos los UAV en dirección hacia arriba. La razón de ello es porque con hélices orientadas hacia abajo el soporte para aterrizar se encuentra la mayoría de veces en el camino entorpeciendo así su movimiento y la distancia hasta el suelo es más grande y así la probabilidad de tocar el suelo será menor. Además, para operaciones con cámara sería menos practicable porque las hélices entorpecerían la visión de la cámara. Igualmente, con las hélices montadas en dirección hacia abajo la distancia entre la tierra y las hélices sería más baja y así más probable de romperse. Pero respecto al flujo del aire, un montaje de las hélices en dirección hacia abajo tiene más sentido porque habría menos pérdida energética por culpa de los brazos. Por eso mismo, la orientación óptima solo se puede decir después de pruebas. En un principio la dirección empleada será hacia

Desarrollo/ Puesta en marcha

arriba, solo para tener una distancia más alta entre la tierra y las hélices. Otra orientación de hélices es una dirección un poco inclinada como en los UAV con “v-tail”. Es una ordenación para tener más agilidad para el eje vertical, la guiñada.

Respecto al tipo de motor empleado, existen diferentes posibilidades, así como se presentan en la Tabla 8. Aunque debido a la diferencia de precio y a la complejidad, solo tiene más sentido emplear los motores de tipo eléctrico. Eso no significa que no hay UAV con motores de tipo gasolina, así como se puede ver en el capítulo 2.1.

3.3.1. CÁLCULOS / FEM / DIMENSIONAMIENTO

Para realizar el dimensionamiento de perfiles del material compuesto hay que tener en cuenta cinco aspectos importantes: los tipos de fibras, el tipo de perfil, la dirección de las fibras, el tamaño y la carga.

En general, hay tres tipos de fibras para realizar aplicaciones con fuerzas grandes. Estas son las fibras ópticas, las fibras de carbono y las fibras de aramida. Si la fibra óptica tiene suficiente rigidez y la densidad es aceptable, se elegiría este tipo de fibra como primera opción. En caso de que existiera la necesidad de tener piezas del UAV con más rigidez sería mejor utilizar fibras de carbono. Si hay componentes que son más frágiles y que tienen riesgo a impacto o simplemente es necesario tener una densidad menor a la obtenida con fibras ópticas, habría que utilizar fibras de aramida. Estos tipos de fibras son más conocidos por el nombre kevlar que es la marca empleada por la empresa DuPont. Estas fibras tienen la cualidad de tener una resistencia a impacto muy elevada y una densidad menor que la fibra óptica. Sin embargo, tiene un coste mucho mayor que la fibra óptica y una resistencia a la tracción menor que la fibra de carbono. Por eso mismo, la combinación de fibras de carbono y de aramida daría un buen resultado. Los valores característicos más importantes de estos tres tipos de fibras se pueden ver en la Tabla 9. [28]

Tabla 9 Valores característicos de las fibras [28]

<i>Fibra</i>	<i>Densidad [g/cm³]</i>	<i>Resistencia tracción [N/mm²]</i>	<i>Módulo de elasticidad [kN/mm²]</i>	<i>Alargamiento de rotura [%]</i>
Óptica	2,53-2,6	2400-3500	73-86	3-4,1
Carbono	1,75-1,96	1750-5000	295-500	0,35-1,6
Aramida	1,45	2800-3000	65-130	2,1-4,3

Para desarrollar el perfil, al principio se tienen que estudiar los distintos tipos de perfiles que hay en el mercado. Para los materiales compuestos en especial hay normalmente cuatro tipos de perfiles diferentes: redondo, rectangular, en T y en U. Estos perfiles se pueden clasificar en perfiles abiertos (T, U) y perfiles cerrados (redondo, rectangular). El segundo momento de inercia axial de dichos perfiles es muy parecido entre ellos. En cambio, la inercia a torsión no.

En particular, los perfiles cerrados tienen la ventaja de tener un valor mayor y con eso una rigidez mayor a cargas que causan torsión. Por eso, es conveniente elegir entre un perfil redondo y uno rectangular.

Para escoger entre dichos perfiles se han hecho cálculos de FEM de los dos perfiles con una fuerza y con un momento combinado con una fuerza. Los perfiles están sujetos por un lado y expuestos por el otro lado al ataque de la carga. El material, las fuerzas y el momento son los mismos y así no tiene importancia como son. Solamente importan la diferencia de tensiones y de desviaciones entre los dos perfiles. Los resultados obtenidos los cuales se pueden ver en el anexo concluyen que un perfil redondo presenta menos desviaciones en fuerzas tal como en momentos. Las tensiones máximas para una fuerza son muy parecidas en un perfil redondo y en uno rectangular. Por otro lado, las tensiones para un momento son mucho mayores en un perfil rectangular que en un perfil redondo. Por tanto, en este proyecto se utilizarán perfiles redondos para el soporte.

Un aspecto a tener en cuenta para elegir el perfil es la dirección de las fibras. El material compuesto tiene propiedades anisótropas debido a la propiedad de las fibras y a las características del tubo, influyendo así en las direcciones de las fibras. Esas direcciones se pueden conseguir con diferentes tipos de fabricación. Pero al principio tienen que clarificarse los tipos de cargas que hay. En una constelación de las hélices en H existen fuerzas que resultan en una flexión y torsión, Figura 20, Figura 30. Ahora se tiene que mirar que dirección de fibras serían las óptimas para ese tipo de carga. Las orientaciones de $\pm 45^\circ$ se emplean para obtener fuerzas que producen torsión. En cambio, las orientaciones de 0° y 90° se utilizan para fuerzas que resultan en flexión. Por último, las direcciones unidireccionales son buenas para la tracción.

Un proceso de fabricación empleado es la pultrusión el cual es un método continuo que permite obtener los tubos siempre con una dirección de fibras 100% unidireccional. Otro proceso de fabricación es el “pullwinding” el cual es un proceso parecido al proceso de pultrusión con la modificación de tener un aparato que añade fibras durante la rotación del tubo. Este método tiene la ventaja de obtener una rigidez de torsión y una resistencia a compresión más alta. Otro proceso de fabricación es la operación de bobinado. Con ese método se puede producir cualquier dirección de fibra. Normalmente esos tubos se hacen con diferentes capas y con diferentes orientaciones. Especialmente, este tipo de perfil es el preferido para realizar aplicaciones con flexión. [29] Los tubos elegidos para este proyecto son de la empresa ClipCarbono y tienen una dirección de las fibras 0° y 90° que se llama malla vista. No son los perfiles óptimos para torsión, pero puesto que no ocurre solo una carga de tensión, sino que también tiene lugar una de flexión hay que buscar un término intermedio. Además, estas son direcciones normales que se puede encontrar fácilmente.

La última parte a tener en cuenta es el dimensionamiento del tubo. Para eso se tienen que mirar las fuerzas aplicadas y calcular las tensiones máximas, así como la flexión de diferentes tubos. El formato empleado es una H y para utilizar el mismo diámetro de tubo para todo el soporte hay dos tubos en el centro. En la Figura 20 se pueden ver las fuerzas aplicadas simplificadas que son los cuatro u ocho motores (flechas lilas) y el peso del UAV (flechas azules).

Desarrollo/ Puesta en marcha

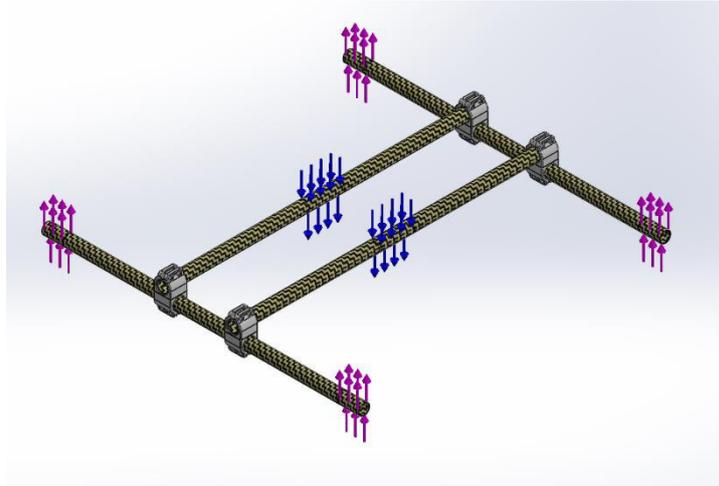


Figura 20 Fuerzas aplicadas en el soporte

Eso se puede simplificar a una barra tendida. Las propiedades de los materiales son del fabricante clipcarbono, Tabla 10. La longitud desde un motor hasta la mitad del tubo es de 225 mm y la fuerza es de 36,6 N, que resulta del empuje de 2 veces del motor, que es necesario para expandir el UAV luego con ocho motores de tipo coaxial.

Tabla 10 Propiedades de materiales [23]

<i>Resistencia a tracción [MPa]</i>	<i>Resistencia a compresión [MPa]</i>	<i>Fracción de Volumen de las fibras [%]</i>	<i>Módulo de Young [GPa]</i>
600	570	60-65	110-120

Tabla 11 Tensiones, flexiones tubos

<i>Diámetro interior [mm]</i>	<i>Diámetro exterior [mm]</i>	<i>Módulo de resistencia [mm³]</i>	<i>Tensión máx. [N/mm²]</i>	<i>Momento de inercia [mm⁴]</i>	<i>Flexión máx. [mm]</i>	<i>Peso [g/m]</i>
6	8	34,36	239,66	137,44	-13,48	38,04
8	10	57,96	142,07	289,81	-6,39	48,91
10	12	87,83	93,76	527,00	-3,52	59,78
12	14	123,98	66,42	867,86	-2,13	70,65
14	16	166,41	49,49	1331,25	-1,39	81,52
16	18	215,11	38,28	1936,01	-0,96	92,39
18	20	270,10	30,49	2700,98	-0,69	103,26

Los valores de tensión y flexión para diferentes tubos están en la Tabla 11. Las fórmulas utilizadas para calcular la tensión y la flexión son las siguientes. El diámetro elegido es el que tiene un diámetro exterior de 16 mm. Ningún diámetro listado excede de la tensión máxima. Así el valor más importante es el de flexión. Para tener el menor número de oscilaciones posible y ser lo más ligero posible hay que utilizar un término medio.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{w} = \frac{M_{max}}{I} * \beta \quad (21)$$

$$I_{x,y} = \frac{F * l^3}{3 * E * I} \quad (22)$$

A excepción de los tubos, el resto de componentes deben ser impresos con una impresora 3D. A continuación, se explican brevemente los diferentes procesos de impresión. En general, se habla de tecnologías de fabricación aditiva. En el siguiente paso, se hablará sobre las diferentes tecnologías más habituales y sobre las ventajas y desventajas que tienen. Las tecnologías de fabricación aditiva son capaces de construir modelos en 3D complejos apilando o añadiendo capas finas de material. Este método tiene muchas ventajas similares a los métodos de fabricación convencionales. Así como la posibilidad de fabricar modelos más complejos y necesitar menos tiempo en el modelo 3D frente a un modelo sólido. Las aplicaciones más comunes para estas componentes son las empleadas en el sector de “Rapid Prototyping” para disminuir el tiempo de desarrollo, pero también hay aplicaciones como “Rapid Manufacturing” como en el caso de este TFM. Aquí se quiere reducir el esfuerzo para fabricar componentes complejos especialmente para piezas con una cantidad de unidades pequeñas. Se pueden clasificar las tecnologías de fabricación aditiva dependiendo de la materia prima en tres categorías, líquida, sólida y en polvo.

Las técnicas basadas en la materia prima de tipo sólido tienen un cabezal de extrusión para calentar filamentos plásticos poliméricos como ABS o PLA. Esta técnica se llama FDM

Desarrollo/ Puesta en marcha

(Fused Deposition Modeling). El cabezal posiciona el material dependiendo de los datos del modelo 3D y construye así el modelo capa a capa. Muchas veces hay dos cabezales de extrusión para el material del componente y un segundo material para apoyarlos. El material empleado para hacer el soporte es soluble por lo que es fácil de quitar cuando ya está la pieza terminada. Las aplicaciones para esta técnica son modelos de conceptos, componentes con empleo directo y aplicaciones médicas. Las ventajas de esta técnica son un precio bajo y la obtención de piezas resistentes. Las desventajas son la calidad de la superficie donde siempre aparecen ranuras de las capas impresas, la necesidad de soporte para piezas más complejas y un proceso que necesita mucho tiempo.

Otra técnica está basada en emplear materia prima líquida y se llama estéreo-litografía (SLA). Un láser u otra fuente con rayos UV es reflejado con un espejo y dibuja el modelo en capas en un polímero líquida. Todas las partes que son tocadas con los rayos empiezan a polimerizar y a forma una capa sólida. Después de cada capa la plataforma baja dependiendo del espesor de la capa. Los materiales utilizados son fotopolímeros que tienen la capacidad de conectarse con rayos UV. Las aplicaciones de esta técnica son modelos de concepto, moldes, componentes con empleo directo y aplicaciones médicas. El procedimiento SLA tiene la capacidad de hacer piezas con superficies súper finas y una precisión de producción muy alta. Además, se pueden imprimir piezas con alta complejidad y transparentes. Las desventajas son que solo se pueden utilizar materiales poliméricos de UV, solo se podría imprimir en un color y no se pueden cargar los componentes con temperaturas o esfuerzos elevados. Así mismo existe la necesidad de imprimir un soporte, porque el líquido no puede apoyarse en la estructura.

La técnica basada en materia prima en polvo se puede dividir en general en dos tipos diferentes, el 3DP (3D Printing) y el SLS (Selective Laser Sintering). El 3DP como dice el nombre ya tiene un cabezal de impresión parecido a una impresora normal. Antes de cada proceso de impresión, un rodillo pone una capa de polvos en el espacio de impresión. Después el cabezal de impresión pone un conglomerante específico según el modelo 3D en los lugares de interés. Después del proceso se tiene que infiltrar cada pieza con un ingrediente de relleno. Con este componente la pieza obtenida tiene finalmente sus características mecánicas. La ventaja de este proceso es la posibilidad de fabricar piezas en diferentes colores. Además, la fabricación es barata, necesita poco tiempo y no requiere un soporte. Las desventajas son una resistencia mecánica pequeña y una superficie rugosa. El polvo utilizado es un polvo especial con una homogeneidad muy elevada.

El otro tipo basado en material de polvo es el SLS. La diferencia es que las partículas no se conectan con un conglomerante, sino con un efecto térmico, como un láser. La ventaja de esta técnica comparada con el 3DP es una resistencia mecánica más elevada. Por otro lado, las desventajas son un precio más alto, más tiempo de fabricación y la posibilidad de deformarse. Posibles materiales de polvos son plásticos, metales, aluminio y arena.

En general, hay dos posibles procedimientos para fabricar las piezas de interés, el SLS y FDM. Sin incluir los costes, la fabricación con una impresora de tipo SLS sería la mejor solución para imprimir las piezas necesitadas. Existe la posibilidad de imprimir con diferentes tipos de plástico y también con aluminio obteniendo como resultado resistencias de las piezas

bastante altas. Pero por culpa de la disponibilidad de las piezas tienen que ser impresos con una impresora de tipo filamento, de la empresa Zortrax. [30] [31] [32]

Para construir piezas que se pueden imprimir con una impresora 3D de tipo filamento se tiene que tener en cuenta algunas guías de construcción. En general, se puede imprimir casi cualquier forma. Sin embargo, para tener resultados satisfactorios de la superficie, imprimir en el menor tiempo posible, tener una buena estabilidad y además no gastar tanto material para soportes hay que planear bien las piezas desde el principio. Cada pieza tiene que tener una superficie lo suficientemente grande (normalmente mayor que 1 cm²) y plana para tener una base. Eso es necesario para que la pieza se pegue durante el proceso de impresión. Además, hay que intentar conseguir que la pieza no tenga desplomes mayores a 45 o 60° de vertical. Porque si hay desplomes más grandes es necesario imprimir soportes. Además, las piezas deben ser construidas de forma que las fuerzas se apliquen en un plano paralelo al plano base. Grandes fuerzas que están fuera de este plano pueden provocar la separación de las capas de la estructura. [33] Otro aspecto importante es el “relleno”. Para disminuir la cantidad del material, los materiales están contruidos normalmente con una funda y diferentes patrones dentro, Figura 21. El porcentaje se puede adaptar a las necesidades de las fuerzas aplicadas. Sin embargo, con el objetivo de hacer dimensionamientos fiables y utilizar el método de elementos finitos los componentes en este trabajo son sólidos. Eso es importante por lo menos en las piezas expuestas a grandes fuerzas. Pero con un relleno de 100% el material no tiene comportamiento como un material normal. Por un lado, mediante el proceso de impresión las condiciones de los materiales cambian de isótropo a anisótropo. Asimismo, cambian las condiciones de los materiales en general. Eso pasa mediante el aspecto de que las líneas impresas nunca van a formar una pieza sólida, pero siempre van a tener oclusiones de aire. Además, la razón que las piezas impresas con una impresora 3D de tipo filamento son anisótropo es que la temperatura del material se enfría durante el proceso y así hay una conexión peor entre capas más viajes. Y también como se imprime filamentos las moléculas del termoplástico se originan en dirección de los filamentos que también resulta en un comportamiento anisótropo.

Por lo tanto, se tienen que hacer pruebas de tracción con el “relleno”, el material y el espesor de las capas queridas. Pero como no hay suficiente tiempo pueden guiarse por pruebas realizadas en otras publicaciones.



	<i>Resistencia a tracción [MPa]</i>	<i>Diferencia [%]</i>	<i>Módulo de Young [MPa]</i>	<i>Diferencia [%]</i>
ABS 3D [34]	28,5	63	1875	78
ABS [35]	45	100	2400	100
ABS Zortrax	30,3	-	1860	-

Desarrollo/ Puesta en marcha

PLA 3D [34]	56,6	64,3	3368	93
PLA	88	100	3600	100
Z-HIPS Zortrax	34,3	-	2260	-
Z- ULTRAT Zortrax	46	-	2450	-

Figura 21 Relleno con diferentes patrones

Tabla 12 Características mecánicas

En la Tabla 12, se puede ver la comparación entre las condiciones de los diferentes materiales. Están listados los valores característicos de los materiales con una prueba imprimido [34], un tipo de material industrial y el material de la marca de la impresora utilizada. Las pruebas fueron hechas con un relleno de 100% y el valor es la media de pruebas con una dirección de los filamentos en 0°/90° y 45°/45°. Esos valores indican que el rango de tamaño y las condiciones de los materiales cambian si están imprimidos con una impresora de 3D. Los cálculos de FEM son hechos con el programa de Solid Works. Eso tiene la ventaja de que la simulación ya está integrada en el CAD y se pueden realizar cambios más rápidos. Es recomendable utilizar materiales de la empresa Zortrax ya que no necesitan ajustes. La desventaja es que no se sabe de qué tipo de material ese trata. Pero con las propiedades de materiales de Zortrax y los valores de porcentaje se puede hacer cálculos para tener una idea. En este caso los cálculos de FEM son utilizados para tener una orientación de las tensiones máximas en cada pieza. Así se pueden evitar desfavorables picos de tensiones en las piezas. El material utilizado va a ser HIPS como tiene una resistencia alta a los impactos aún tiene un valor menor parecido a Z-ULTRAT de resistencia a tracción. A continuación, se va a utilizar el valor de 63% del material HIPS para comparar con las simulaciones de FEM.

Seguidamente, está explicado el proceso del diseño con los pasos individuales. Al principio se mira el nivel de la técnica que son en el primer caso las conexiones de tubos que hay actualmente en el mercado y como son los diferentes tipos. El siguiente paso es pensar en las fuerzas aplicadas que van a actuar sobre la pieza. Después se hace un diseño y calculaciones con el método de FEM y en caso afirmativo se adapta o cambia el diseño. En la Figura 22 se puede ver las fuerzas que actúan la pieza para conectar los tubos. Las flechas verdes indican un momento que puede ocurrir. Además, hay fuerzas de tracción y fuerzas de presión para sujetar la pieza con los tubos. Para hacer cálculos falta una evaluación del tamaño de las fuerzas que está listado en la Tabla 13. La fuerza de tracción es el empuje de dos motores.

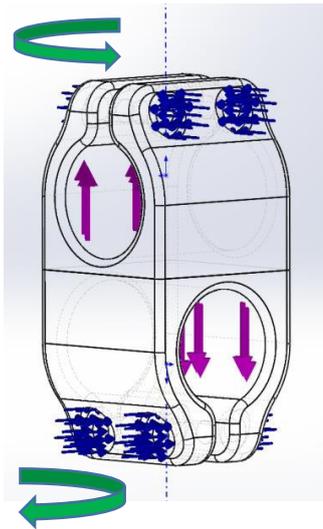


Tabla 13 Fuerzas aplicadas

Fuerza	Flecha	Valor
Tracción	Morado	36,6 N
Torsión	Verde	5,625 Nm
Presión	Azul	200 N

Figura 22 Fuerzas aplicadas pieza conexión tubos

En la hoja de datos está escrito que el máximo valor de empuje con la hélice y la batería utilizado es de 18,3 N. Conforme a la lista de condiciones se tiene que calcular con dos motores, para se podría poner otro motor en el futuro. Así resultaría aproximadamente en 36,6 N para cada conector de tubos. En la Figura 24 se puede ver las fuerzas que están presente. Las flechas verdes indican una sujeción y las flechas morados indican la fuerza de dos motores en cada lado. La torsión de los conectores de los tubos son teóricamente 5,625 Nm. Eso se puede ver en la Figura 23. Los colores de flechas tienen el mismo sentido. Así con el peso del UAV y de la distancia de los tubos de 450 mm hay un momento que ocurre. El tamaño para una conexión es entonces el valor medio del momento. Para determinar el valor de las fuerzas de la presión para sujetar los tubos se tiene que mirar la formula(24). La fórmula indica como de grande tiene que ser la fuerza de los tornillos para que el tubo no pueda girar con las fuerzas/ momentos que ocurren.

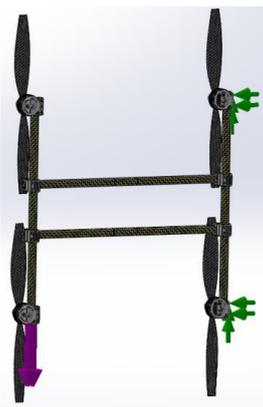


Figura 23 Momento conexión tubo

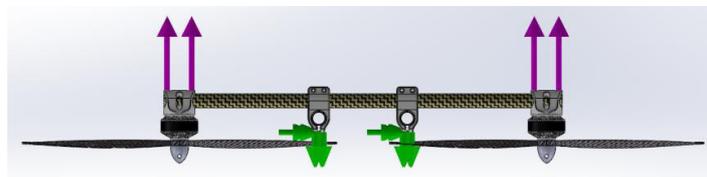


Figura 24 Fuerza tracción conexión tubo

Desarrollo/ Puesta en marcha

El momento M_t se genera del producto de la fuerza de dos motores (36 N) y la distancia hasta la conexión de los tubos de 157 mm. Eso está basado en una simplificación del sistema. Pero para tener una estimación del momento es suficiente. Las distancias resultan del CAD y el coeficiente de fricción es estimada. Como el coeficiente de fricción de ABS con ABS son 0,5 μ el valor entre los tubos y el material de Zortrax está estimada a 0,4. Para los tornillos se utiliza al final tornillos de tipo M3. Ellos tienen con la clase de resistencia de 8.8 una posible fuerza de precarga de 2,25 kN. Por lo tanto, suficiente y mucho más grande que el valor necesitado. Además, hay dos tornillos en cada pieza en vez de uno solo. La existencia de dos tornillos permite disminuir las fuerzas puntuales y distribuir las fuerzas por toda la pieza.

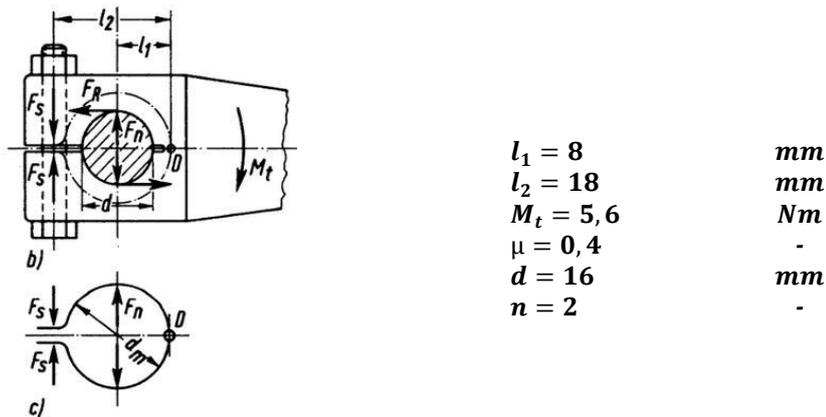


Figura 25 Momento de apriete [36]

$$M_R = F_R * d = F_n * \mu * d \geq M_t \quad (23)$$

$$F_s \geq \frac{M_t * l_1}{n * l_2 * d * \mu} = \frac{5,6 * 0,008}{2 * 0,018 * 0,016 * 0,4} = 194,4 \text{ N} \quad (24)$$

Al final se tiene que hacer los cálculos de FEM. El objetivo es evitar picos de tensiones y diseñar las piezas para que tengan lugar tensiones uniformes de la mejor manera posible. Además, se puede ver la tensión máxima para tener una idea. Aunque ese valor se puede solo comparar con un valor de artículos como esta descrito antes.

En las imágenes; Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29 se puede ver la fuerza de presión aplicada en la pieza y un mejoramiento de la esquina de la pieza para reducir las tensiones. Para comparar las tensiones máximas se puede tener el valor 21,6 MPa. Eso son 63 % de la resistencia a tracción del material Zortrax-Hips, Tabla 12. Todas las simulaciones son hechas con los parámetros siguientes de la red (red súper fino, red estandarte y 4 puntos de Jacobi).

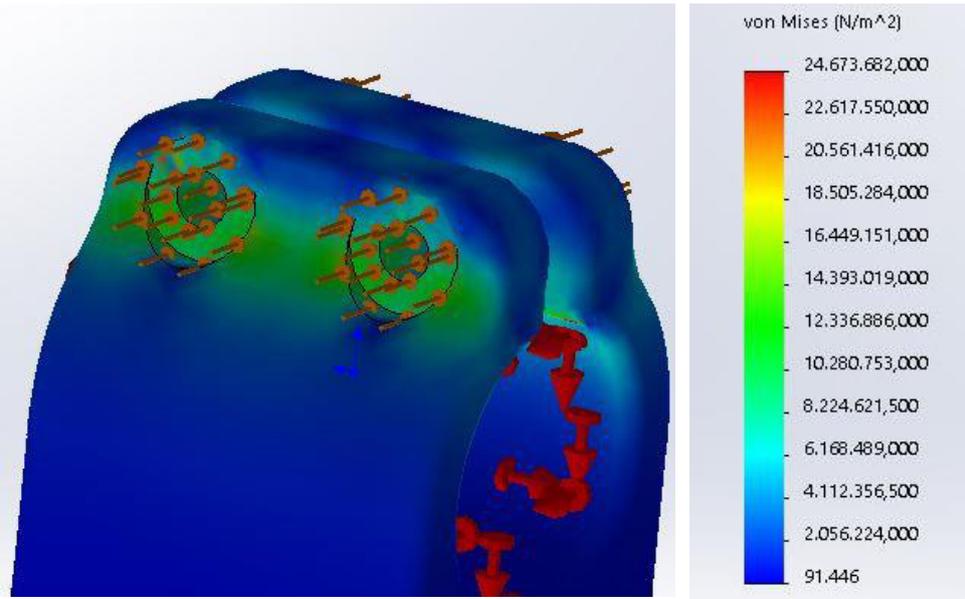


Figura 26 FEM conexión tubos 1

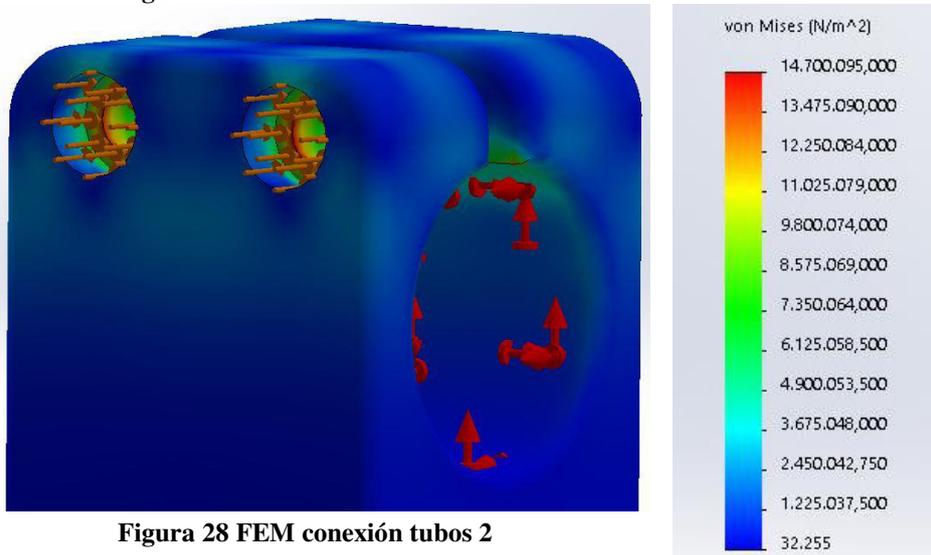


Figura 28 FEM conexión tubos 2

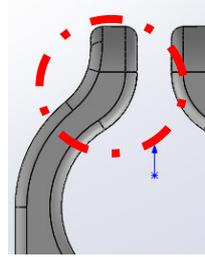


Figura 27
Conexión tubos
diseño 1

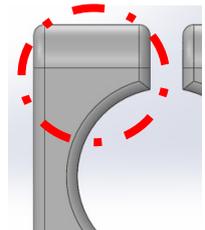


Figura 29
Conexión tubos
diseño 2

El primer diseño, Figura 26 fue construido por un peso menor, pero al final cambiado para tener una rigidez mayor. Se puede ver que los picos de tensión bajan desde 24 MPa hasta 14 MPa. Además, se puede ver que no ocurren tensiones en una superficie tan grande como antes. Una fuerza de sujeción de las piezas lo suficientemente grande como para conectar los tubos es muy importante, porque entre otros factores de eso depende la resistencia a la torsión del UAV, Figura 30.

Desarrollo/ Puesta en marcha

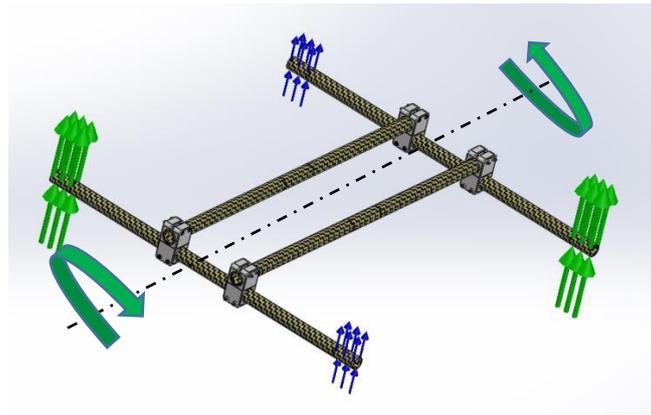


Figura 30 Torsión resultando de la guiñada

En la Figura 31 se puede ver las tensiones que resultan del momento y de la fuerza aplicada. El pico de tensión está también más bajo que el valor de resistencia a tracción del material HIPS.

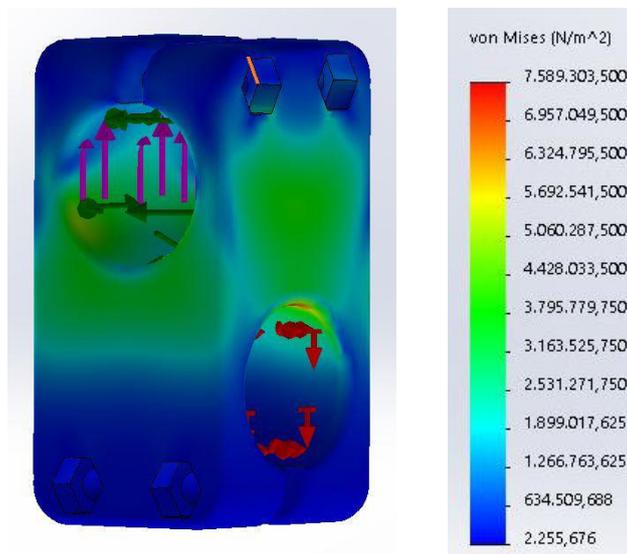


Figura 31 FEM conexión tubos

En la Figura 32 se puede ver los resultados del FEM de la conexión del motor con el tubo. Las flechas rojas significan otra vez una sujeción. Las flechas marrones son la fuerza para sujetar la pieza. La fuerza es del mismo valor para las piezas que para conectar los tubos, de 200 N para cada superficie. Las flechas lilas son en total la máxima fuerza del motor que es de 20 N en total. Se puede ver que solo en la zona de sujeción de la pieza ocurren tensiones mayores. Por eso todas estas piezas tienen un redondeo para evitar picos de tensiones.

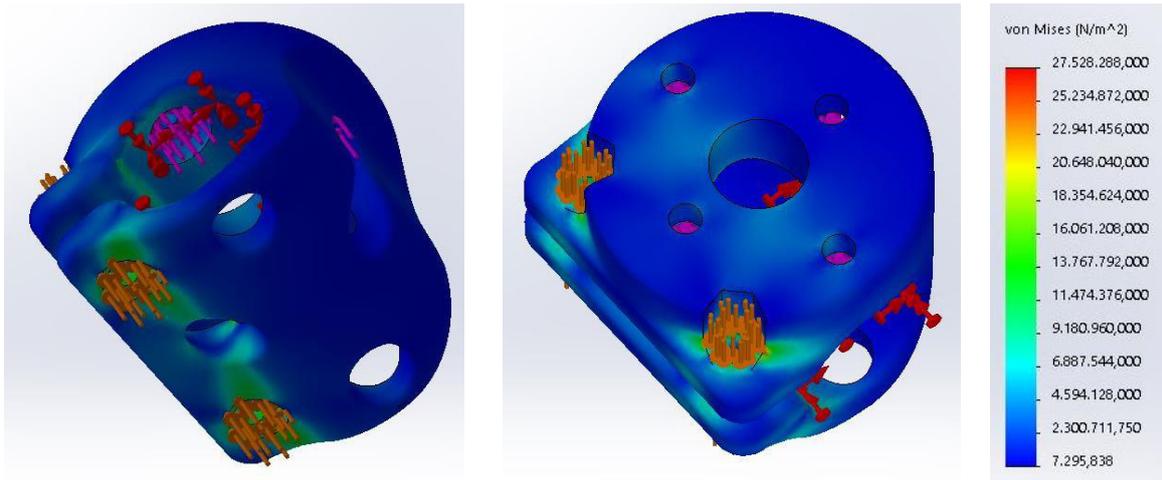


Figura 32 FEM conexión Motor

En la Figura 33 se puede ver los resultados de la simulación FEM del soporte de la batería. Para el valor de la fuerza para sujetar la pieza (flechas marrones) con el tubo esta utilizado otra vez el valor de 200 N como indicio. Las flechas verdes y lilas indican el peso de la batería que son redondeado a 10 N. Se puede ver que no hay ninguna tensión con un valor peligroso o cerca de 21 GPa.

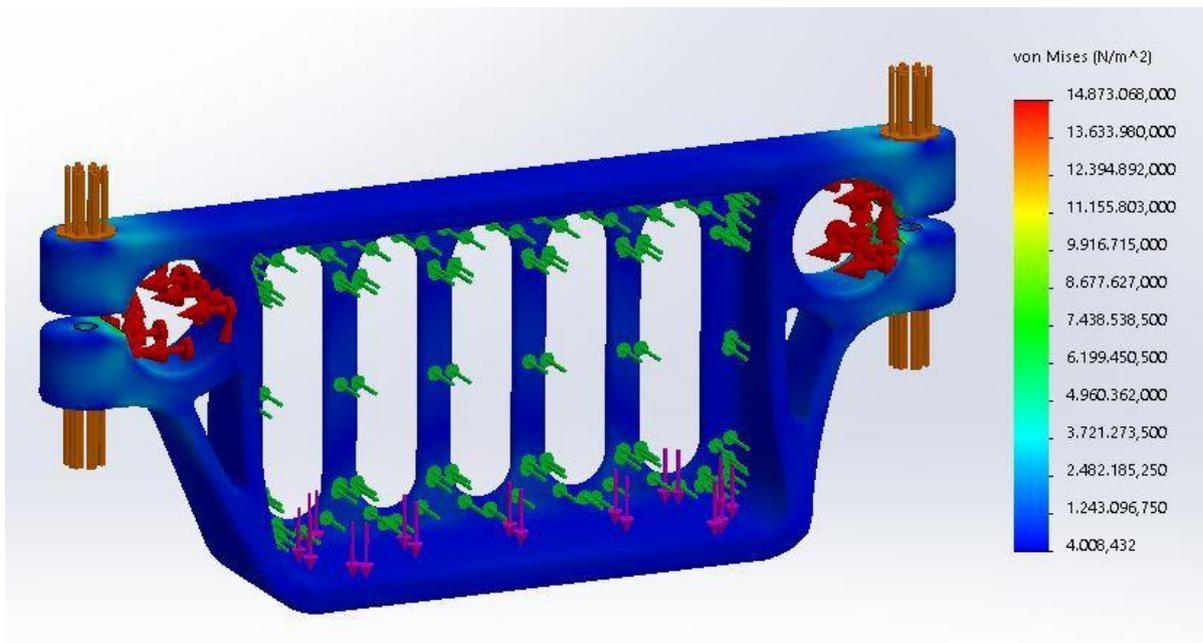


Figura 33 FEM soporte batería

Con una fuerza mayor se puede ver donde ocurren los picos de tensiones. Para este cálculo se ha aumentado la fuerza horizontal (flechas verdes) a 50 N y la fuerza vertical (flechas lilas) a 100 N, Figura 34; Figura 35. En la Figura 35 se puede ver el primer diseño. La Figura 33 y Figura 34 es el rediseño con las mejoras. Los resultados muestran una reducción de las tensiones.

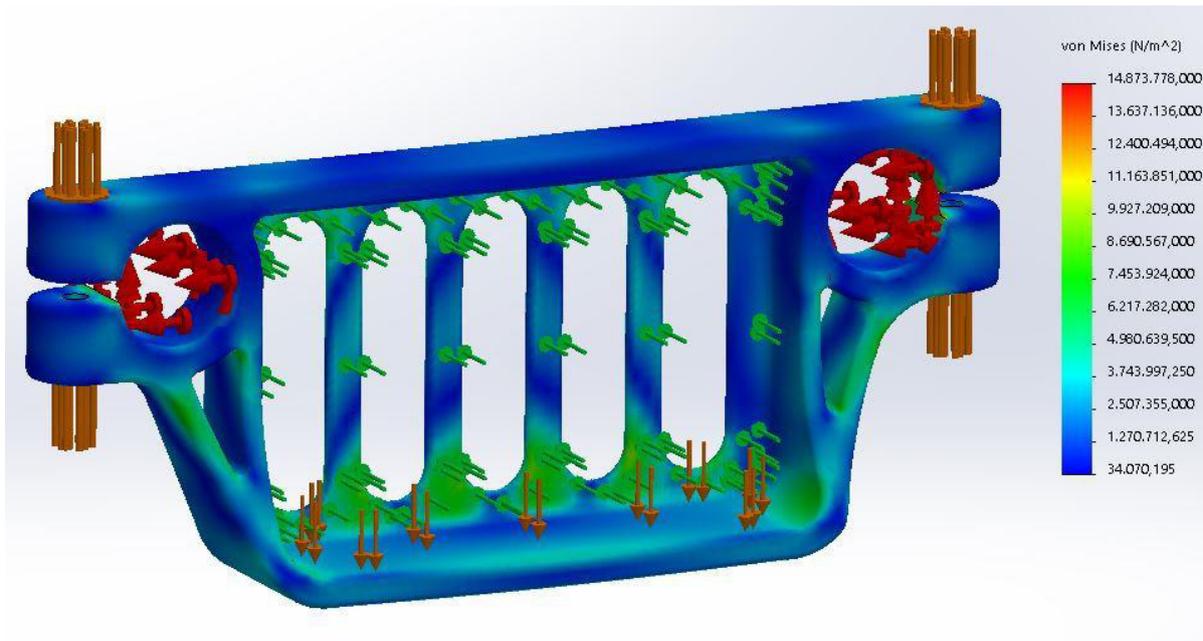


Figura 34 FEM soporte batería con fuerza mayor y modificado

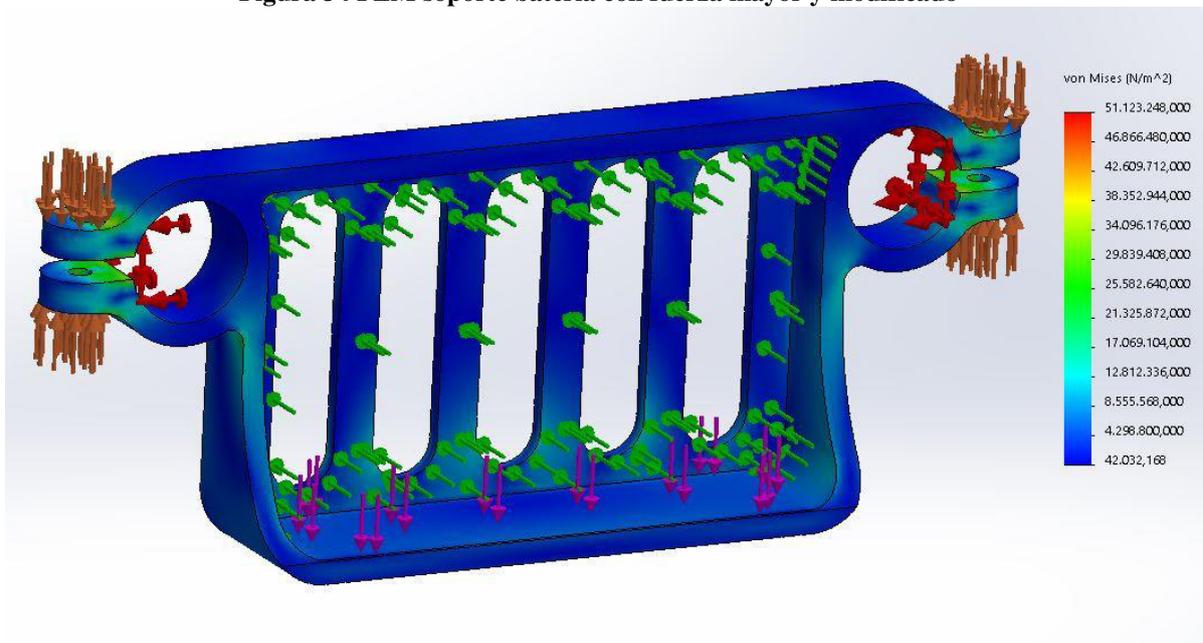


Figura 35 FEM soporte batería con fuerza mayor

En la Figura 36 se puede ver el soporte para aterrizar. Hay una de sujeción igual que en las piezas anteriores (flechas rojas), una fuerza para enclavar el tubo (flechas marrones) y un momento (flechas verdes). El momento se produce debido a la fuerza peso del dron y la geometría del soporte para aterrizar, Figura 37, formulas (25) y (26). La fuerza que sujeta las piezas se puede calcular de la misma manera que la de la pieza que conecta los tubos, formula (27). El valor calculado es de 73,3 N; por esto, el valor utilizado para la simulación será de 200 N, suficientemente grande para dar seguridad.

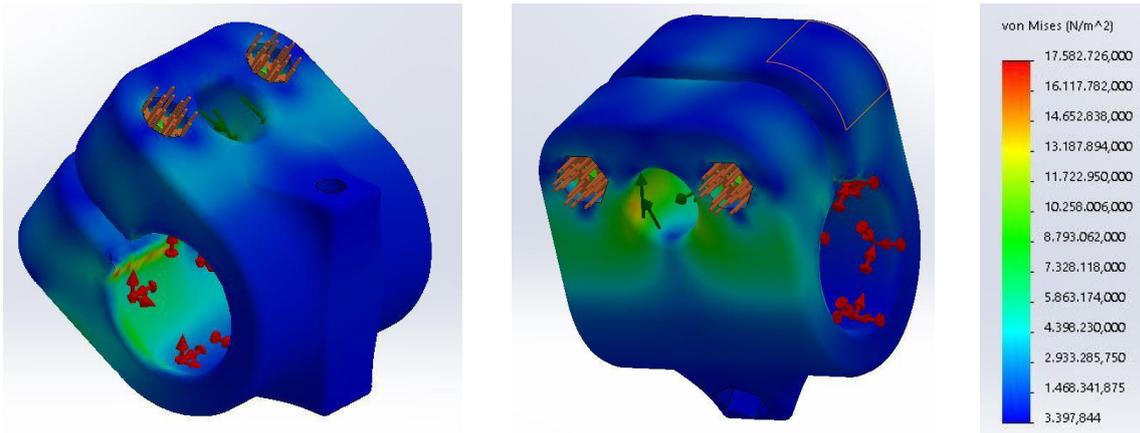
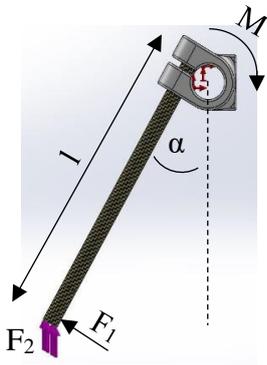


Figura 36 FEM soporte aterrizar



$\alpha = 30^\circ$
 $l = 125 \text{ mm}$
 $F_2 = 25 \text{ N}$
 $F_1 = ?$
 $M = ?$

Figura 37 Momento soporte aterrizar

$$F_1 = F_2 * \sin \alpha = 25 \text{ N} * \sin 60 = 21,6 \text{ N} \quad (25)$$

$$M = F_1 * l = 21,6 \text{ N} * 0,125 \text{ m} = 2,7 \text{ Nm} \quad (26)$$

$$F_s \geq \frac{M_t * l_1}{n * l_2 * d * \mu} = \frac{2,7 * 0,008}{2 * 0,023 * 0,016 * 0,4} = 73,3 \text{ N} \quad (27)$$

El diseño final se puede ver en la Figura 38. El soporte de la batería se ha diseñado para que se pueda desplazar con facilidad en la dirección de los tubos. Eso es importante, porque la placa tiene que estar en el centro debido a los sensores. Siendo la batería el único peso que se puede mover para mantener equilibrio del dron. Los tubos de aterrizar están también conectados con el soporte de la placa. Eso tiene la ventaja de dar mayor estabilidad frente a la torsión del soporte de aterrizaje y también mayor estabilidad frente a la torsión de todo el dron.

En el anexo se incluyen planos de las piezas que se han fabricado con la impresora, la complejidad de estas algunas veces es bastante elevada; por lo que los planos indican las dimensiones más importantes.

Desarrollo/ Puesta en marcha

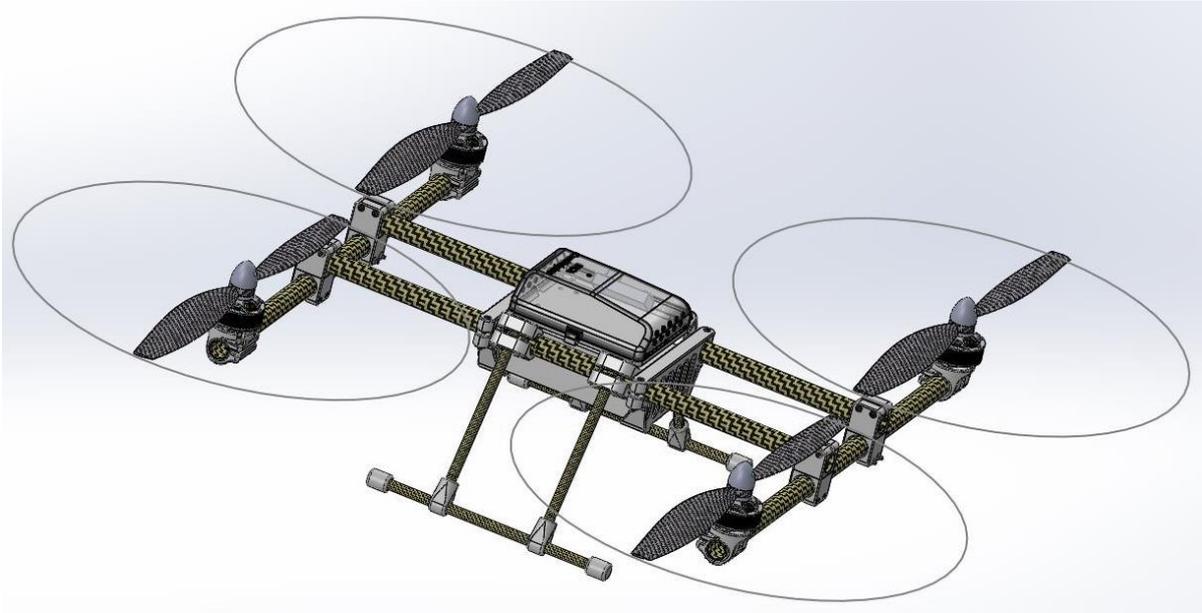


Figura 38 Diseño completo del dron con Solid Works

3.3.2. FABRICACIÓN/ MONTAJE

El primer y más importante de los pasos a seguir es la orientación de la pieza dentro impresora. Las piezas que tienen que unir dos tubos se han impreso según un ángulo de 45° , Figura 40; esto permitirá que la pieza tenga un mejor comportamiento mecánico. De esta forma no coincidirán en una misma capa dos grandes huecos y disminuirá la probabilidad de laminación. Imprimirlo así tiene la ventaja de tener agujeros limpios, sin soporte y con una precisión mayor. En la Figura 40 se pueden ver diferentes piezas mecanizadas, en las que el hueco para el tubo de carbono sale muy bien; pero los agujeros horizontales están rellenos con soporte y por esto tienen una menor precisión (círculo rojo).

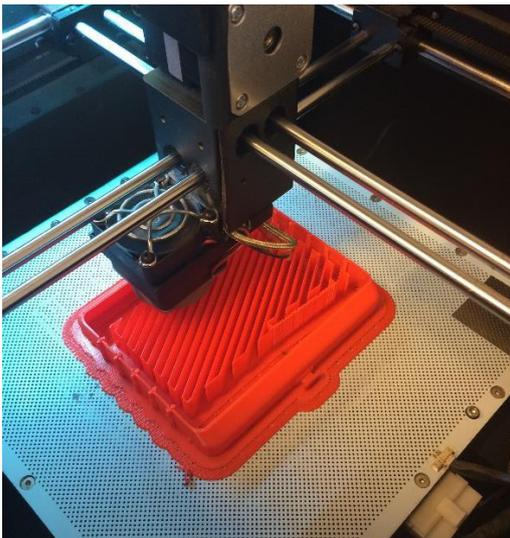


Figura 39 Proceso de imprimir como ejemplo con la pieza caja



Conexión soporte aterrizar



Conexión motores



Conexión tubos



Soporte batería



Soporte aterrizar



Caja

Figura 40 Piezas mecanizados

Los pasos a seguir para imprimir son:

- exportar los datos del objeto en el formato stl.
- ajustar algunos parámetros de la impresora, Figura 41, el material, el espesor de las capas y el llenado. Además de la calidad y hasta que ángulo de desplome se pone soporte.

Las orientaciones elegidas de todas las piezas se pueden ver en el anexo.

Las posibilidades del espesor de las capas son de 0,14 a 0,39 mm. Para verificar si el espesor de las capas tiene una influencia grande en las propiedades mecánicas se revisa el artículo de las propiedades mecánicas de los materiales impresos con una impresora 3D. [34] La información que da el artículo trata de piezas que se han imprimido con tres diferentes espesores de capas: 0,2; 0,3; 0,4 mm. En la resistencia a tracción y el módulo de Young no se puede identificar una correlación del espesor de las capas y las propiedades mecánicas. Por esto se decide elegir el valor menor, 0,14 mm. En la Tabla 14 se puede ver el tiempo total del proceso de imprimir y de las piezas por separado. Todas las piezas se han impreso con el material HIPS. Solo el soporte para la placa y la caja se han impreso con el material ULTRAT, para poder imprimirlo lo más fino posible. Las piezas de las conexiones de tubos del diseño 2 se han imprimido además en ultrat.

Desarrollo/ Puesta en marcha

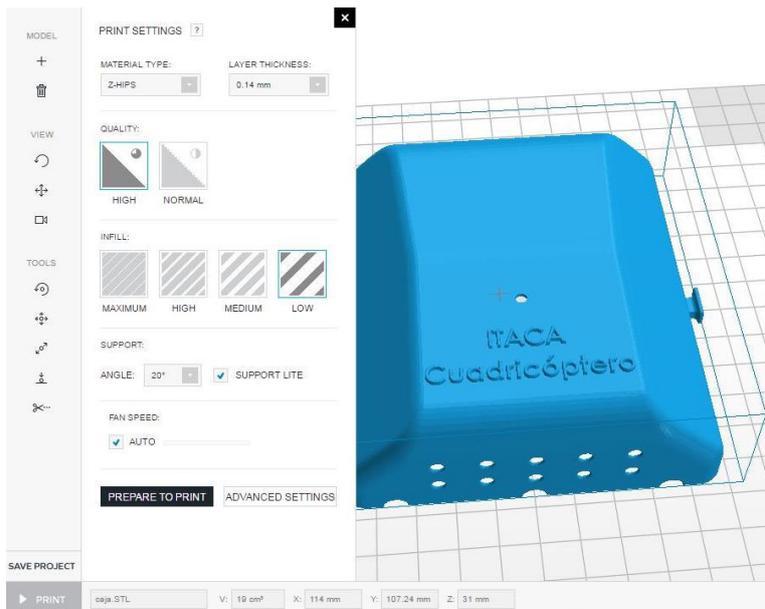


Figura 41 Menú de ajustar de la impresora

El tiempo de imprimir de todas las piezas se puede ver en la Tabla 14. El tiempo total ha sido de 67 horas y 15 min.

Tabla 14 Tiempo de imprimir

Componentes Mecánica	tiempo de imprimir [min]	Número de piezas	tiempo de imprimir total [h:min]
Conexión tubos	196	4	13:04
Conexión motores	180	4	12:00
Soporte batería	330	2	11:00
Conexión tubos aterrizar	274	1	04:34
Caja	468	1	07:48
Soporte placa	250	1	04:10
Soporte aterrizar	220	4	14:40
total	-	17	67:16

En la Figura 42 se puede ver los cables para conectar la batería con la placa y los reguladores. Los cables están entre la batería y el soporte para la placa. Para proteger la batería esta puesto una placa del viejo soporte de la caja. Así no hay deformaciones de la batería. En la Figura 43 se puede ver la caja con las partes electrónicas. En la Figura 44 se puede ver el dron completo. Los cables de los motores están trenzados para reducir los campos eléctricos y magnéticos.

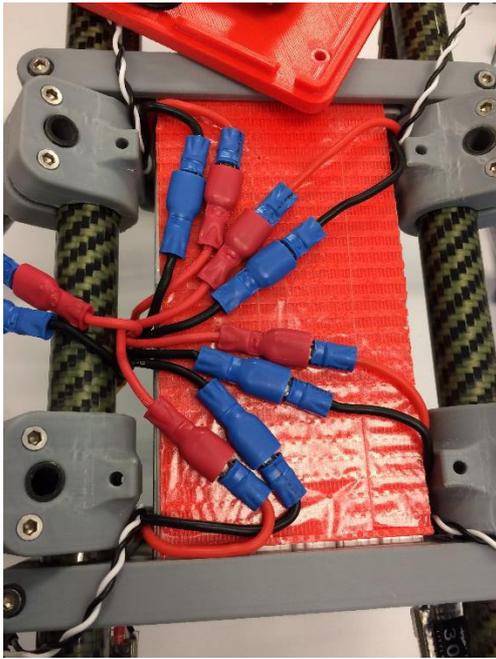


Figura 42 Conexiones batería reguladores

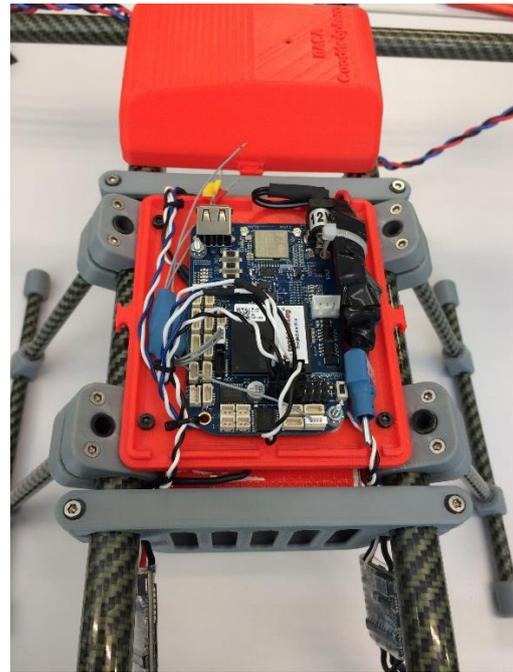


Figura 43 Placa, DC/DC convertidor, interruptor, convertidor lógico



Figura 44 Dron completa

Desarrollo/ Puesta en marcha

El peso final del dron es de 2044 gramos, 44 gramos más que el peso estimado. La razón es, por un lado, que se han utilizado diferentes hélices, cuyo peso es mayor que el de las elegidas inicialmente y por otro lado no se podía cumplir el objetivo del peso del soporte de 450 gramos. La diferencia de peso es muy pequeña y afectará solamente muy poco al tiempo de vuelo.

3.4. Subsistema soporte lógico

3.4.1. IMPLEMENTACIÓN DE ARDUPILOT

La implementación de Ardupilot a la placa BeagleBoneBlue está basado en el trabajo de Mirko Denecke. [37] Para alimentar la placa al principio es suficiente conectar el portátil y la placa vía USB. Para tener todas las salidas en marcha se tiene que conectar una batería de tipo Lipo 2S o 12 V con el conector de alimentación. Para trabajar con Linux lo más común es estabilizar una conexión de remoto con SSH (Secur SHell). Para eso se tiene que descargar el programa Putty y abrir un terminal con la dirección de IP de BeagleBoneBlue.

192.168.7.2

La placa BeagleBoneBlue ya va con el sistema Debian GNU/Linux 8 instalado. El nombre de usuario y la contraseña son por defecto:

```
Usuario:   debían
Contraseña: tempPWD
```

Para saber que está haciendo la placa es saber los significados de los LEDs.

```
USR0 parpadea en el proceso de boot
USR1 parpadea en el acceso de la carta SD
USR2 parpadea en la actividad de CPU
USR3 parpadea en la actividad de eMMC
WIFI esta encendido si tiene conexión con una red
```

Al principio se tiene que conectar con wifi para descargar ardupilot y actualizar debían. Los pasos para conectar con un wifi son los siguientes:

```
Connmanctl
Technologies (para ver si está activado)
Enable wifi
Scan wifi
Services
Agent on (para conexiones protegidos)
Connect wifi_xxxx_xxxx_managed_psk
```

Con una conexión a internet se puede descargar actualizaciones del sistema.

```
Sudo apt updat && sudo apt upgrade -y
```

Después se puede descargar Ardupilot con el siguiente comando:

```
sudo apt install -y bb-cape-overlays cpufrequtils ardupilot-copter-blue
```

Además, se tienen que hacer algunos cambios más, tales como añadir el DTB (Device Tree Blob) BLUE, poner el reloj a 1 GHz, actualizar los scripts e instalar el núcleo 4.4. Al final se tiene que hacer un “reboot” del sistema.

```
sudo apt update && sudo apt upgrade -y
sudo apt install -y bb-cape-overlays cpufrequtils ardupilot-copter-
blue
sudo sed -i 's/#dtb=~/dtb=am335x-boneblue-ArduPilot.dtb/'
/boot/uEnv.txt
sudo sed -i 's/GOVERNOR="ondemand"/GOVERNOR="performance"/g'
/etc/init.d/cpufrequtils
cd /opt/scripts && sudo git pull
sudo /opt/scripts/tools/update_kernel.sh --ti-rt-channel --lts-4_4
sudo reboot
```

Para ejecutar Ardupilot se tiene que poner el siguiente comando en el terminal.:

```
sudo /home/debian/arducopter
```

Para conectar además con un Groundstation se tiene que poner dependiendo del tipo de conexión otros parámetros. En general hay dos opciones de conectar, vía módulo de radio o vía wifi. Para conectar vía wifi se tiene que poner además del comando anterior el siguiente cambiando la dirección de IP con la del portátil utilizando.

```
sudo /usr/bin/ardupilot/blue-arducopter -A udp:192.168.1.11:14550
```

Además, se puede establecer una conexión con un módulo de radio que en este caso está conectando con el puerto de USB.

```
sudo /usr/bin/ardupilot/blue-arducopter -C /dev/ttyUSB0
```

En el “Mission Planner” se tiene que elegir la forma de conexión entre UDP para una conexión de wifi o el com-port para el módulo de radio. Para el “Baudrate” se tiene que poner el valor 57600 que es el valor que utilizan los módulos por defecto.

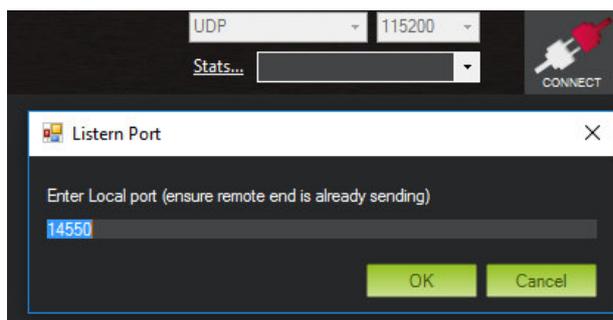


Figura 45 Establecer conexión vía wifi

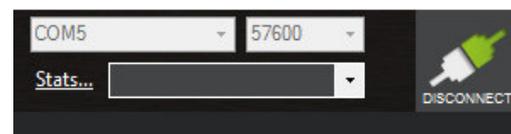


Figura 46 Establecer conexión vía radio

Para conectar la placa con el GPS se tiene que añadir además el puerto donde está conectado, que es el UART2. Así al final la instrucción para ejecutar Ardupilot y conectar vía radio y establecer el GPS es el siguiente.

```
sudo /usr/bin/ardupilot/blue-arducopter -C /dev/ttyUSB0 -B /dev/ttyO2
```

Ahora que falta es que el programa funcione desde el principio de encender la placa.

Desarrollo/ Puesta en marcha

4. PRUEBAS

El capítulo de pruebas incluye los posibles modos de volar, la configuración teórica de los parámetros PID, las disposiciones legales y al final el primer vuelo.

4.1. Disposiciones legales/Normativas

Antes del primer vuelo se tiene que dar en cuenta las leyes y regulaciones de los UAV. Porque todavía no hay una regulación general en Europa se va a hablar de las limitaciones de los países Alemania y España.

4.1.1. *NORMATIVA DE ALEMANIA*

En Alemania hay una ley nueva desde del 07.04.2017 para regular el tráfico aéreo de los UAV. Así no está permitido de volar sobre y más cerca de 100 metros a aglomeraciones de personas, de centros industriales, edificios de las autoridades, lugares de acción de policía y personal de emergencias, de autopistas, carriles. Además, está permitido de volar en la noche, en las áreas de seguridad de aeropuertos, sobre reservas naturales, en zonas urbanas (solo si hay un permiso del propietario). Solo hay el permiso de volar entre la visibilidad y hasta una altura de 100 m. En alturas más altas se necesita un permiso de la autoridad responsable y además se tiene que hacer un tipo de formación. Esta formación se tiene que hacer también para vehículos que pesan más de 2 kg. En general no pueden pesar más de 25 kg y si pesan más de 5 kg se necesita un permiso de la autoridad responsable. En general es necesario poner un cartel inflamable con nombre y la dirección a todos los vehículos que pesan más de 0,25 kg. Además, si hay cámaras se tiene que dar en cuenta de las leyes de privacidad. La utilización de un sistema FPV (First Person View) está autorizado si no estás volando más alto que 30 m y el UAV no pesa más que 0,25 kg o si hay una persona que está vigilando el UAV y el espacio aéreo con la posibilidad de indicar posibles peligros. [38] En general para todos los UAV es obligado tener un seguro de responsabilidad. No hay una diferenciación entre el uso de un UAV comercial y no comercial. Solo hay regulaciones en general para todos los usuarios.

4.1.2. *NORMATIVA DE ESPAÑA*

Las leyes y restricciones en España son parecidas, pero hay algunas diferencias. Así hay en el siguiente una descripción de las regulaciones en España. Al contrario de las leyes de Alemania, en España hay una diferenciación entre el uso con fines comerciales y el uso hobby. Pero aparte del motivo del uso del UAV, hay restricciones que son las mismas. Así no se puede operar en zonas urbanas, volarlo sobre aglomeraciones de personas como en parques, playas, conciertos, bodas, manifestaciones, procesiones, volarlo de noche, operar en espacio aéreo controlado, volarlo cerca de aeropuertos, aeródromos, poner en peligro a terceros. Por lo demás todos los drones deben llevar fijada en su estructura una placa de identificación con la identificación del UAV y los datos necesarios para ponerse en contacto con la persona/empresa.

Pruebas

No se puede volar más alto que 120 m y a una distancia más lejos que 500 m además tienes que tenerlo siempre en vista. Legal es volar con un peso hasta 25 kg. Si el peso del dron es además inferior de 2 kg se puede volar sin tenerlo en vista y más lejos de 500 m. Si la masa de la aeronave exceda de 25 kg, es necesario estar inscritas en el Registro de matrícula de aeronaves, disponer de certificado de aeronavegabilidad

Si quieres ganar dinero con un dron tienes que estar registrado en AESA, ser piloto de drones y tener un certificado médico en vigor. [39]

4.2. Modos de volar

Para hacer pruebas y ser capaz de controlar el UAV se tiene que conocer los modos de volar del software Ardupilot y el comportamiento de ellos. Así se explica brevemente los diferentes modos más importantes que hay.

En el modo “stabilize” hay una estabilización de los tres ejes para los movimientos de guiñada, de cabeceo y alabeo. Se puede manejar el vehículo y si no se toca el mando el UAV se estabiliza. Pero el acelerador sigue los comandos del mando directamente.

Si el modo de “Alt Hold” esta encendido el UAV mantiene una altura y los otros movimientos se comportan como en el modo de “stabilize”. El piloto puede controlar la tasa de ascenso/descenso. Si el palo del mando está en el centro entre 40%-60% el UAV mantiene la altura. Con una posición del palo arriba o debajo de estos valores el UAV aumenta o reduce la altura. El modo de “Alt Hold” trabaja con los valores del barómetro y para distancias más pequeñas de 8 metro el sonar puede dar una precisión todavía mejor.

Con el modo de “Loiter” el UAV intenta de estar en la misma posición, si el piloto no está dando mandos.

En el modo de “RTL” el UAV va a subir a una altura por defecto de 15m y después vuelve al inicio donde el UAV ha sido encendido.

El “Auto” modo es para misiones con mapas. Aquí se puede planear una ruta aquel el UAV va a seguir luego. Las rutas planeadas tienen puntos con información de dirección y altura.

En el modo “Acro” el piloto tiene todo el control del vehículo. Este modo es para hacer saltos y el FPV.

El modo de “AutoTune” es una ayuda para calibrar los reguladores PID. El UAV empieza con un eje y oscila. Los valores PID se adaptan automáticamente. El principio de funcionamiento es de poner un error en el sistema y mirar la respuesta del sistema.

El modo de “Brake” es un modo de emergencia que para el vehículo y no acepta ningún mando del piloto. Solo con un cambio del modo se puede dar mandos otra vez.

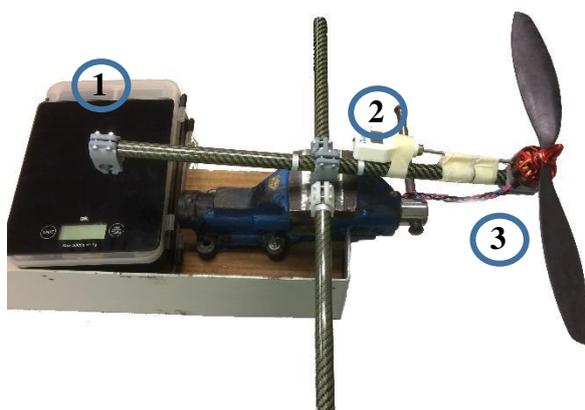
Con el modo “Guided” se puede controlar el UAV desde una estación de la tierra utilizando una conexión inalámbrica. Se puede enviar posiciones queridas desde del programa como “Mission Planner”

El modo “Land” tiene el objetivo de aterrizar el vehículo. El vehículo va a bajar hasta 10 m y después bajar más dependiendo del valor “Land_Speed” que tiene un valor de 50 cm/s por defecto.

El modo de “Follow Me” es para hacer videos de sí mismo. Para eso se necesita un módulo de GPS, una conexión inalámbrica con una estación de tierra y a móvil/portátil.

4.3. Motor/Regulador

Para evaluar los datos del motor como corriente, fuerza y temperatura máximo con los componentes elegidos se hecho la siguiente configuración de prueba, Figura 47 . Los datos deben que corresponder con los valores de hoja de datos de la empresa SunnySky; pero como la hélice y el regulador son diferentes es siempre recomendable hacer pruebas antes del primer vuelo. En la Tabla 15 se puede ver los resultados de la prueba. En general hay coinciden los valores. Solo al final con 80%/100% de gas excede el motor el límite de corriente con un valor en total de 17 A. El límite del motor son 15 A para 30 s como está escrita en la hoja de datos.



1. Bascula
2. Sensor térmico
3. Motor

Figura 47 Configuración de pruebas del motor

Tabla 15 Valores Motor medido

Gas [%]	Corriente [A]	Empuje [g]	Temperatura [°C]
20	0,25	180	
30	1,10	389	
40	3,15	702	40°
50	6,4	1100	
60	9,2	1380	
70	14,2	1640	
80-			75°
100	17	1730	

Tabla 16 Valores Motor SunnySky

Corriente [A]	Empuje [g]	Temperatura [°C]
1	310	-
2	490	-
3	630	-
4	770	-
5	910	-
6	1040	-
7	1140	-
8	1240	-
9	1320	-
10	1420	-
12	1570	-
14,2	1830	70

Así con esta constelación se puede volar hasta 70% de gas para no aumentar el valor máximo de corriente. Una solución para tener una constelación con una eficiencia mayor sería

Pruebas

por un lado hacer pruebas con otras hélices más caras que puedan tener una eficiencia mayor. Estas pueden ser por ejemplo de la empresa APC. Por otro lado, se puede ajustar el “timing” de los reguladores. El timing equivaldría en un motor combustible a un encendido prematuro, para tener el par óptimo, se tiene que encender la mezcla de aire y gases antes del punto muerto superior. Y es lo mismo con un motor “brushless”. Aquí las bobinas del motor necesitan por culpa de la inductancia un poco de tiempo hasta el campo magnético está establecido. Así este valor cambia dependiendo del motor y de las bobinas. El fabricante SunnySky no pone ningún valor a disposición. Por lo tanto, las pruebas se han hecho en el modo “Auto-timing”. Además, está la posibilidad de configurar los reguladores con una placa aditiva. Los valores de “timing” orientativos para motores que tienen 14 o más polos están entre 25 y 30°. [25]

4.4. Configuración de los parámetros PID

El regulador utilizado en el software Ardupilot es un regulador de tipo PID. Es el regulador más utilizado en el campo industrial. El 95% de los reguladores industriales son reguladores PID. [40] Para configurar un control de PID se tiene que entender el funcionamiento general y su aplicación práctica a los diferentes valores de un UAV. PID significa Proporcional Integral Derivativa. Conforme la ecuación diferencial de un controlador PID (28) la parte P multiplica el error con el valor P así esta parte se puede decir que representa el presente. Es una respuesta inmediata y la parte más importante. Cuanto mayor sea la desviación mayor será la reacción del control. La parte integral multiplica el valor I con la suma de los errores del pasado, que es el integral. Por eso se puede hablar de la parte de pasado del control. Esa parte es importante si hay un error que ocurre durante un largo tiempo, como viento o un coptero desequilibrado por culpa del peso. Cuanto más tiempo hay desviación normal, más grande va a ser la reacción del control. La última parte es la parte D que multiplica el valor D con el pendiente del error. Así es posible decir algo del futuro del error. La parte D tiene un efecto de alisar la respuesta del sistema y sirve para disminuir las oscilaciones. En general se dice que este valor es para Cuadricopteros el valor menos importante. Los tres valores están correlacionados. Por eso un cambio de un valor afecta siempre a los dos otros valores.

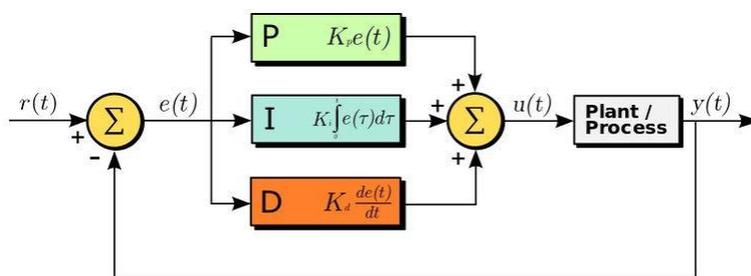


Figura 48 Regulador PID [41]

$$U_t = K_{pid} * \left(e + \frac{1}{T_n} * \int e * dt + T_v * e \frac{d}{dt} \right) = K_p * e(t) + K_i \int e * dt + K_d * e \frac{d}{dt} \quad (28)$$

Ahora la pregunta es: ¿cómo se puede ajustar los parámetros de PID para el cuadricoptero? En general un cuadricoptero es un sistema inestable y no lineal. Como no son conocidos los parámetros del sistema controlado existe la posibilidad de descubrir los valores

del control con diferentes procedimientos como las reglas de Tieve- Schenk y Ziegler- Nichols o un procedimiento empírico. Todos los procedimientos son experimentales. Para los dos procedimientos de Tieve-Schenk y Ziegler-Nichols se tiene que poner los valores $T_n=0$ y $T_v=\infty$. Así el control funciona como un control P. Ahora para el procedimiento de Tieve-Schenk se tiene que cambiar el valor KPID hasta el sistema responde con una oscilación transitoria lenta. Ahora se tiene que descubrir el periodo de oscilación T_S . Con este valor se puede calcular los valores T_V y T_N , formula (29),(30).

$$T_V = \frac{T_S}{2 * \pi} \quad (29)$$

$$T_N = 10 * T_V \quad (30)$$

Por otro lado, para el método de Ziegler-Nichols se tiene que cambiar el valor KPID hasta el sistema responde con una oscilación constante. Con los valores KCRIT y el periodo de oscilación T_p se puede leer los valores T_V y T_N de la Tabla 17. [40]

Tabla 17 Valores Ziegler-Nichols

Control	KCRIT	TN	TV
P	0,5* KCRIT	-	-
PI	0,45* KCRIT	0,85* T_p	-
PID	0,6* KCRIT	0,5* T_p	0,12* T_p

El problema con los dos métodos de Ziegler-Nichols y Tieve Schenk es que por un lado necesitas los valores del sistema/ sensores y, por otro lado, un soporte para que se puedan hacer las pruebas en el suelo y que se fige un eje y así solo mover el cuadricoptero por el otro eje. Por lo tanto, el método más común es una solución empírica. El software Ardupilot tiene para todos los controles de PID valores por defecto del dron 3DR IRIS. Estos valores deben de funcionar más o menos bien, y al principio se tienen que hacer pruebas si es posible volar con suficiente estabilidad para ajustar y mejorar los valores de los diferentes controladores en el aire. La ventana del Mission Planner para ajustar los valores del control es la siguiente,

Pruebas

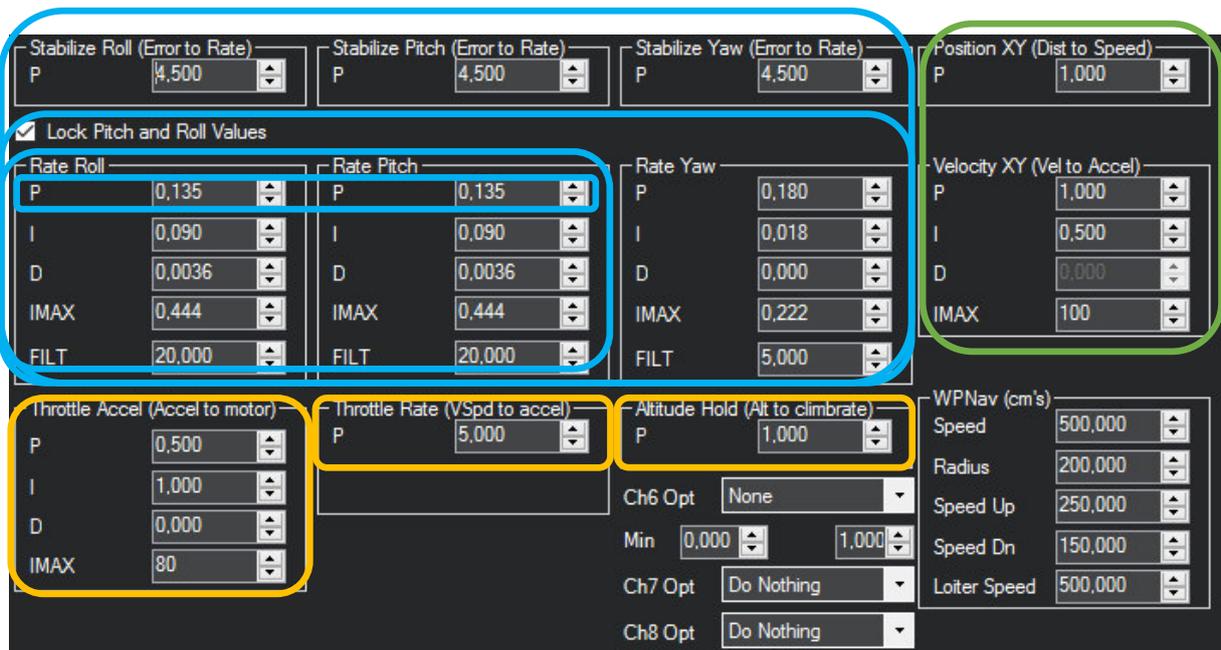


Figura 49 Ajustar controladores PID de Mission Planner

Los círculos azules muestran la importancia de los reguladores y también el orden para ajustar los diferentes reguladores. Los valores del círculo más pequeño son los valores más importantes. Se empieza con unos de los valores P del controlador de Rate Roll o Rate Pitch y hay que cambiar poco a poco los valores desde el círculo interior hasta el círculo más grande. El orden de ajustar es el valor P, D y el último el I. El control para un eje consta en general de dos partes. Por un lado, existe un lazo para controlar el ángulo y por otro lado tiene un lazo para ajustar la velocidad angular, que es el “rate”. El valor de “stabilize” por el otro lado traduce el ángulo deseado en a una velocidad angular, que después llegará al control “rate”.

En los círculos naranjas están los lazos de control para la altura. Aquí hay además de los dos lazos de la altura (altitude Hold) y la velocidad (throttle rate) un lazo para la aceleración (throttle Accel). Esta parte no se tiene que ajustar normalmente. Los ajustes también se tienen que hacer desde del lazo más pequeño que es la aceleración hasta el más grande, que es la altura. El círculo verde indica el control para el modo “Loiter”.

Al principio se tiene que poner el UAV en el modo “stabilize” y poner los dos valores de I y D a 0. Además, para ajustar los valores durante el vuelo se tiene que poner el valor para ajustar en el canal 6 y definir un rango. La mejor solución ahora será fijar el modelo para que se puede girar solo por un eje. La otra posibilidad es cambiar el valor directamente en el vuelo que tiene el peligro de caer y destruir el UAV. Independiente del método utilizado se tiene que aumentar el valor P hasta el UAV tiene un compartimiento satisfactorio. Si se tiene la impresión de que el UAV se comporta muy lento, se tiene que aumentar el valor P. Si el UAV empieza a oscilar es valor P es demasiado grande. Después se sigue con el valor D. Se tiene que aumentar este valor hasta el punto que el UAV empieza hacer oscilaciones muy rápidas. El valor máximo de D y el valor óptimo es justo un poco menos. Después de ajustar el valor P es recomendable ajustar el valor P otra vez. Al final se puede ajustar el valor I.

Como es un dron de carga y en el futuro se quiere montar y desmontar la carga rápidamente, hará falta estudiar la influencia del peso en el comportamiento del dron. Por lo tanto, se tienen que hacer pruebas con diferentes pesos e investigar si es necesario ajustar los parámetros de los controles.

4.5. Primer vuelo

Para realizar el primer vuelo se ha de elegir un área suficientemente grande sin personas y un día con poco viento. Es recomendable probar en una superficie lisa los movimientos del Dron, para garantizar que los direcciones que pide el mando sin correctos o si no para invertir estas señales. También es recomendable reducir la curva de gas al principio; de esta forma se garantiza menor aceleración y mayor tiempo para reaccionar. La curva se puede aumentar cuando el dron esté controlado. En muchos mandos se puede programar un timer para saber el tiempo de vuelo. Así se puede medir el voltaje las celdas de la batería con intervalos para evitar una descarga profunda y poder determinar el tiempo de vuelo futuro. Como ya se ha comentado el voltaje más bajo para una celda de una batería de tipo litio-polymer no debería ser inferior de 3,6 voltios

Pruebas

5. PRESUPUESTO

En el capítulo presupuesto están listados todos los costes del proyecto. Los costes se dividen entre costes de mano de obra, costes de materiales eléctricos y costes de hardware. Los costes de hardware tal como los gastos mecánicos están como pedido en los requerimientos y no exceden el valor máximo.

$$N_{\text{días}} * h_{\text{día}} = t_{\text{total}} = 120 * 7 = 840 \quad (31)$$

Tabla 18 Costes de mano de obra

<i>Descripción</i>	<i>unidades</i>	<i>Coste solo [€]</i>	<i>Coste completo [€]</i>
Ingeniero mecatrónico	840	18	15.120

Tabla 19 Costes materiales eléctricos

<i>Descripción</i>	<i>Números</i>	<i>Coste solo [€]</i>	<i>Coste completo [€]</i>
BeagleBoneBlue	1	74,77	74,77
DC/DC convertidor	1	0,57	0,57
GPS	1	11,00	11
SunnySky V3508 KV380	4	33,70	134,79
Hélice GEMFAN F05307	2	4,79	9,58
Favourite LITTLE BEE	4	11,11	44,44
Gens Tattu (lipo)	1	116,31	116,31
HKPilot Transceiver Telemetry Radio Set V2 (433 Mhz)	1	28,63	28,63
Mando FrSky Taranis Q X7	1	139,00	139,00
Total	19		559,09

Presupuesto

Tabla 20 Costes materiales mecánicos

<i>Descripción</i>	<i>Números</i>	<i>Coste solo [€]</i>	<i>Coste completo [€]</i>
<i>Tubo de fibra de Carbono-Kevlar malla vista (8mm. Ø exterior - 6mm. Ø interior) 1000mm.</i>	1	17,50	17,50
<i>Tubo de fibra de Carbono-Kevlar malla vista (16mm. Ø exterior - 14mm. Ø interior) 1000mm.</i>	2	26,13	52,26
<i>Material HIPS/Ultrat</i>	1	19,50	19,50
<i>Bridas</i>	2	1,00	2
<i>Conectores</i>	1	10	8
<i>Total</i>	7	-	99,26

Tabla 21 Costes totales

<i>Descripción</i>	<i>Coste completo [€]</i>
<i>Ingeniero mecatrónico</i>	15.120,00
<i>Materiales eléctricos</i>	559,09
<i>Materiales mecánicos</i>	101,26
<i>Total</i>	15,780,35

6. CONCLUSIONES

El motivo de este trabajo fue el deseo de desarrollar un vehículo aéreo no tripulado que se pudiese utilizar como base del aprendizaje de futuros alumnos del Master de Mecatrónica de la UPV, así como futuras aplicaciones.

Ha sido útil para la toma de decisiones del diseño del dron utilizar la última tecnología basada en la tabla morfológica Fritz Zwicky. Lo cual ha permitido conseguir el desarrollo de un soporte que cumple todos los requerimientos exigidos, tales como poder ubicar diferentes cargas, de tamaño y peso, y mantener una estabilidad elevada para conseguir un buen comportamiento en el aire. La formación en H y la posibilidad de desplazar la batería del Dron, permite poner una carga en cualquier sitio, tanto debajo de la batería como en la parte atrás o en el frontal del vehículo.

Se pensó en un principio imprimir todas las piezas del dron; pero se desestimó la fabricación de las piezas sometidas a grandes tensiones, porque hubieran requerido mayor tamaño, con el consiguiente aumento de peso y la disminución del tiempo de vuelo del Dron. Estas piezas son prefabricadas con material compuesto de carbón kevlar.

La placa de BeagleBoneBlue y el software de Ardupilot responden correctamente al funcionamiento requerido para aterrizaje automático, FPV, volar rutas programadas y la posibilidad de conectarse con una estación de tierra. Se podría establecer una conexión vía wifi tal como un módulo de radio con el portátil y el programa Mission Planner.

Las pruebas han demostrado que el dimensionamiento de la batería, del regulador y de la hélice son correctos, aunque cabría la posibilidad de mejorarlo. La fuerza de los motores es suficientemente grande; pero el motor consume demasiado corriente a velocidades elevadas, y puede producir un calentamiento crítico.

Los resultados fundamentales de este trabajo son un cuadricoptero potente que se puede utilizar en el futuro para un rango grande de tareas. Además, se ha demostrado la posibilidad de usar partes fabricadas mediante una impresora 3D de tipo filamento en un Dron. Siendo importante tener en cuenta siempre la dirección de las fuerzas y garantizar que las fuerzas más grandes siempre están en la dirección del plano base de la impresora.

Conclusiones

6.1. Líneas futuras

Las líneas futuras serían el mejoramiento de la placa, del soporte mecánico y probar diferentes parámetros del controlador; así como otros modelos de hélices.

Una mejora importante de la placa sería poner en marcha el GPS. También sería bueno tener la posibilidad de medir el voltaje de la batería o incluso de las celdas y mostrar los resultados en un LCD encima del Dron o/y transmitirla información a la estación de tierra. Así como añadir sensores de temperatura para evitar el riesgo del calentamiento de los motores cuando estén funcionando a velocidades altas.

Sería interesante probar otro material para imprimir las piezas. En este diseño las piezas (salvo el soporte de la placa y la caja) se han imprimido con el material HIPS de Zortrax. Se elegido HIPS porque tiene una resistencia elevada a los golpes que podría ser útil en caso de impacto. En cambio, el material ULTRAT tiene una resistencia a tracción 34% más alta que el material HIPS. Las pruebas podrían demostrar que este valor es más importante que un valor alto a los impactos. Además, sería bueno imprimir de diferente color las piezas frontales de las traseras del Dron, esto ayudaría a reconocer la dirección del vehículo en el aire, cosa que actualmente es difícil.

Otra posible mejora, sería proteger el conector, la batería y los reguladores, frente a arcos eléctricos que se producen en el momento de conectar la batería a los reguladores. Esto ocurre porque hay condensadores en el circuito de los reguladores que se quedan cargados al funcionar. Esta descarga eléctrica produce un desgaste del conector y un pico de corriente bastante alto que podría perforar algún componente electrónico.

Estaría bien realizar ensayos con otros parámetros del controlador y otro tipo de hélices; con el fin de conseguir mayor eficiencia del dron.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Real Academia Española,» febrero 2017. [En línea]. Available: <http://dle.rae.es/>.
- [2] Orgnda, Mayo 2017. [En línea]. Available: <http://www.orgenda.de/newsletterprint.asp?letterid=13286>.
- [3] «Universität Oldenburg,» febrero 2017. [En línea]. Available: <http://www.informatik.uni-oldenburg.de/~iug08/snd/definition.html>.
- [4] «N24,» [En línea]. Available: https://www.welt.de/print/welt_kompakt/print_lifestyle/article135929763/Kleine-Geschichte-der-Drohnen.html. [Último acceso: Mayo 2017].
- [5] F. & Sullivan, «Study analysing the current activities in the field of UAV,» European Commission, 2007.
- [6] «el periódico internacional,» febrero 2017. [En línea]. Available: <http://www.elperiodico.com/es/noticias/internacional/primera-entrega-medicamentos-con-drone-eeuu-4370660>.
- [7] «Gizmodo,» [En línea]. Available: <http://gizmodo.com/this-hybrid-quadcopter-drone-can-take-off-and-land-vert-1177032394>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [8] «Hackaday,» [En línea]. Available: <http://hackaday.com/2014/12/16/uav-coaxial-copter-uses-unique-drive-mechanism/>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [9] «sUAS News,» [En línea]. Available: <https://www.suasnews.com/2017/02/increased-demand-asia-combustion-engines-unmanned-helicopters/>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [10] F. Sullivan, «Study analysing the curent activities in the field of UAV,» European commission enterprise and industry directorate general, 2007.
- [11] N. G. Corporation, «Northrop,» [En línea]. Available: <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/GlobalHawk/Pages/default.aspx>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [12] «General Atomics Aeronatical,» [En línea]. Available: <http://www.ga-asi.com/predator-b>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [13] «Schiebel,» [En línea]. Available: <https://schiebel.net/products/camcopter-s-100-system-2/>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [14] «AeroQuad,» febrero 2017. [En línea]. Available: <http://aeroquad.com>.
- [15] «ETH Zürich,» febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2016/01/drohnensteuerung-px4.html>.
- [16] «PX4,» febrero 2017. [En línea]. Available: <http://px4.io/>.
- [17] «Ardupilot,» [En línea]. Available: <http://ardupilot.org/>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [18] «GPS.GOV,» [En línea]. Available: <http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [19] «U-Blox,» [En línea]. Available: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf). [Último acceso: Mayo 2017].
- [20] beagleboard. [En línea]. Available: <https://beagleboard.org/blue>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [21] «MEMSIC,» [En línea]. Available: <https://www.memsic.com/accelerometers/>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [22] K. L. Schulte, «Der Propeller das unverstandene Wesen,» K.L.S. Publishing, 2007.
- [23] D. Gerling, Electrical Machines, Springer, 2015.

Bibliografía

- [24] C. Julien, A. Mauger, A. Vijn y K. Zaghbi, *Lithium Batteries*, Springer, 2016.
- [25] R. Hacker, «Motorflug,» *Fachzeitschrift für den Flugmodellbau FMT*, p. 14, Enero 2011.
- [26] R. c. Massé, E. Uchacker y G. Cao, «Beyond Li-ion: electrode materials for sodium- and magnesium- ion batteries,» link.springer.com, 2015.
- [27] R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer, 2013.
- [28] P. D. F. Pöhler, «Automobiler Leichtbau-Faserverbundwerkstoffe,» HS-Karlsruhe, 2016.
- [29] «R & G Faserverbundwerkstoffe GmbH,» April 2017. [En línea]. Available: [http://www.r-g.de/wiki/Kohlefaser-Halbzeuge_\(Rohre,_St%C3%A4be,_Profile\)](http://www.r-g.de/wiki/Kohlefaser-Halbzeuge_(Rohre,_St%C3%A4be,_Profile)).
- [30] I. Gibson, D. Rosen y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, 2017.
- [31] ProTec3D, «Protec3D,» [En línea]. Available: <http://www.protec3d.de/3d-drucken/vor-und-nachteile/>. [Último acceso: April 2017].
- [32] J. Stampf y M. Hatzebichler, «Additive Manufacturing Technologies,» Springer, 2014.
- [33] J. Steuben, D. L. V. Gossuyt y C. Turner, «Design for fused filament fabrication additive manufacturing,» Agosto 2015.
- [34] B. Tymrak, M. Kreiger y J. Pearce, «Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers under realistic environmental conditions».
- [35] «Rehau,» April 2017. [En línea]. Available: <https://www.rehau.com/download/1029030/materialmerkleblatt-acrylnitril-butadien-styrol-rau-abs-av0270.pdf>.
- [36] H. Roloff, *Maschinenelemente*, Vieweg, 1972.
- [37] «ArduPilot BeagleBoneBlue,» [En línea]. Available: <http://discuss.ardupilot.org/t/beaglebone-blue-released-linux-enabled-autopilot-for-80/15772>. [Último acceso: Juli 2017].
- [38] «Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur,» [En línea]. Available: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/drohnen.html>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [39] «Agencia estatal de seguridad aérea,» [En línea]. Available: http://www.seguridadaerea.gob.es/lang_castellano/cias_empresas/trabajos/rpas/marco/default.aspx. [Último acceso: Mayo 2017].
- [40] H. P. Scherf, «Regelungstechnik,» Karlsruhe, 2007, p. 156.
- [41] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller. [Último acceso: Julio 2017].
- [42] «UAV Asociacion,» febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.uavs.org/commercial>.
- [43] «Monash University,» febrero 2017. [En línea]. Available: http://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html#Beginnings.
- [44] «El Confidencial,» febrero 2017. [En línea]. Available: http://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-12-14/amazon-drones-entregas-envios_1303960/.
- [45] «David Darling,» febrero 2017. [En línea]. Available: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/Kettering_Bug.html.
- [46] «Amazon,» febrero 2017. [En línea]. Available: https://www.amazon.es/DJI-DJI000228-Phantom-3-Standard/dp/B013J39S0M/ref=sr_1_3?ie=UTF8&qid=1486402703&sr=8-3&keywords=dji+phantom.
- [47] «DroneTrest,» Febrero 2017. [En línea]. Available: <http://www.dronetrest.com/t/brushless-motors-how-they-work-and-what-the-numbers-mean/564>.
- [48] F. B. d. Blanco, *Convertidores de potencia trifásicos*, 2017.
- [49] «Clipcarbono,» [En línea]. Available: www.clipcarbono.com. [Último acceso: April 2017].

- [50] «www.memsc.com,» [En línea]. Available: <http://www.memsc.com/accelerometers/>. [Último acceso: Juli 2015].

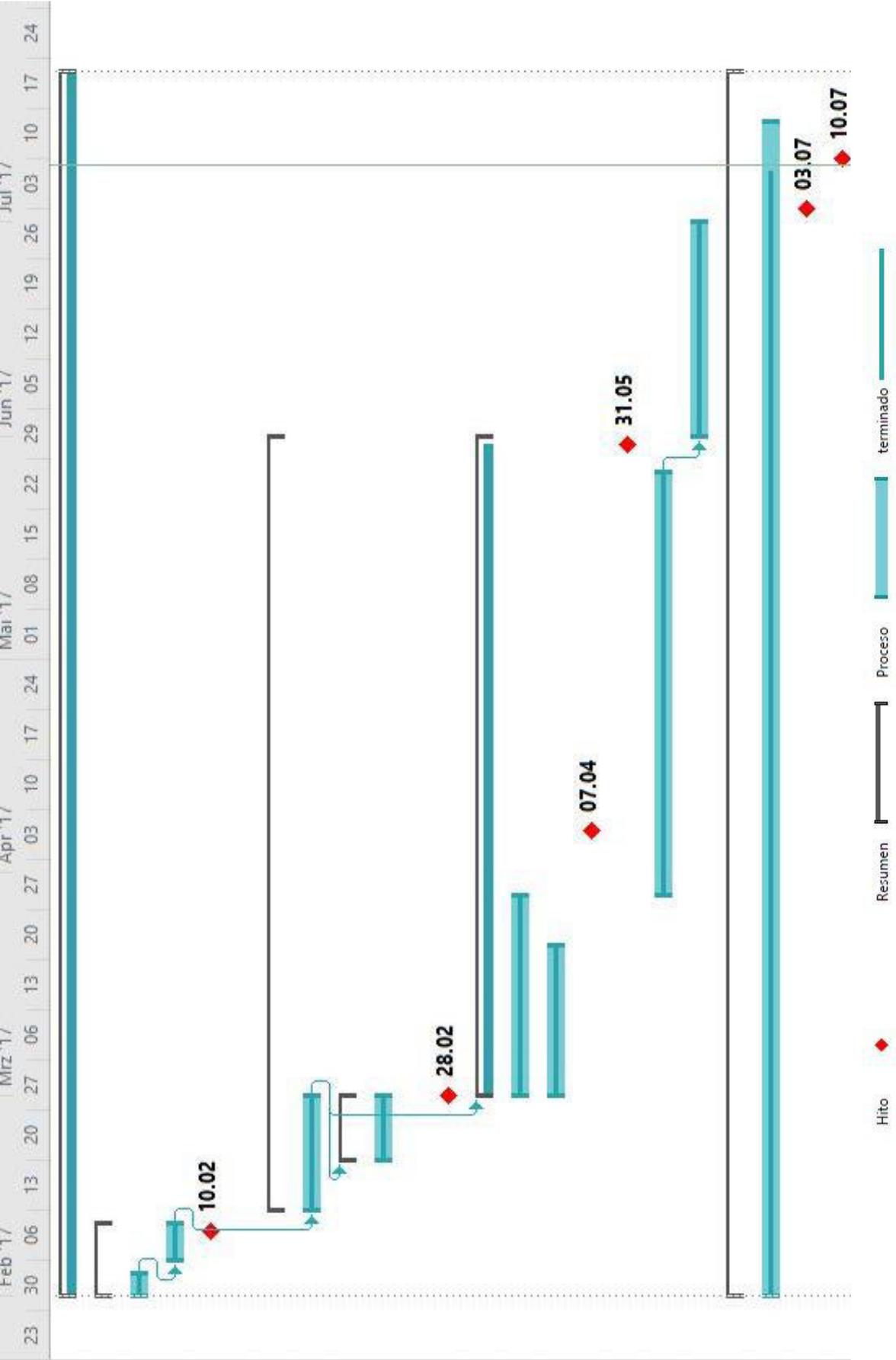
Bibliografia

ANEXO

1. CALENDARIO

	Name	Dauer	Anfang	Ende
1	▸ Trabajo fin de Master desarrollo de un dron	123 Tage	Mit 01.02.17	Fre 21.07.17
2	▸ Preparación	8 Tage	Mit 01.02.17	Fre 10.02.17
3	Familiarizarse con el tema	3 Tage	Mit 01.02.17	Fre 03.02.17
4	Investigación nivel técnica	5 Tage	Mon 06.02.17	Fre 10.02.17
5	Decisión del soporte físico (placa base) y software	0 Tage	Fre 10.02.17	Fre 10.02.17
6	▸ Desarrollo	78 Tage	Mon 13.02.17	Mit 31.05.17
7	Dimensionamiento general	12 Tage	Mon 13.02.17	Die 28.02.17
8	▸ Electrónica	7 Tage	Mon 20.02.17	Die 28.02.17
9	Selección de los componentes electrónicos	7 Tage	Mon 20.02.17	Die 28.02.17
10	Pedir componentes electrónicos	0 Tage	Die 28.02.17	Die 28.02.17
11	▸ Mecánica	66 Tage	Mit 01.03.17	Mit 31.05.17
12	Diseño soporte físico	20 Tage	Mit 01.03.17	Die 28.03.17
13	Simulación FEM fuerzas	15 Tage	Mit 01.03.17	Die 21.03.17
14	Termino del diseño (estructura)	0 Tage	Fre 07.04.17	Fre 07.04.17
15	termino de la fabricación/ montaje	0 Tage	Mit 31.05.17	Mit 31.05.17
16	Implementación del software	43 Tage	Mit 29.03.17	Fre 26.05.17
17	Pruebas	22 Tage	Don 01.06.17	Fre 30.06.17
18	▸ Documentación	123 Tage	Mit 01.02.17	Fre 21.07.17
19	Documentación	118 Tage	Mit 01.02.17	Fre 14.07.17
20	Finalización versión 1	0 Tage	Mon 03.07.17	Mon 03.07.17
21	Finalización versión 2	0 Tage	Mon 10.07.17	Mon 10.07.17
22	Deadline Documentación/ póster	0 Tage	Fre 14.07.17	Fre 14.07.17
23	Presentación	5 Tage	Mon 17.07.17	Fre 21.07.17
24	Deadline Presentación	0 Tage	Fre 21.07.17	Fre 21.07.17

GANTT-DIAGRAMM



2. DIMENSIONAMIENTO IMPULSIÓN

General

Refrigeración del Motor: buena

Nº de rotores: 4

Peso del modelo: 2500 g

Tamaño del amazon: 160 mm

Límite de inclinación de la FCU: sin límite

Altura del campo: 500 m ASL

Temp. aire: 25 °C

Presión (QNH): 1013 hPa

Temp. campo: 1640 ft ASL

Temp. aire: 77 °F

Presión (QNH): 29.91 inHg

Celdas batería

Tipo (Cont./max.C) - nivel de carga: LiPo 6000mAh - 20/30C

Capacidad por celda: 6000 mAh

Resistencia: 0.0038 Ohm

Voltaje: 3.7 V

capacidad C de descarga: 20 C continua

Peso: 142 g

Consumo de corriente: 0 A

Variador

Tipo: max 30A

Resistencia: 0.008 Ohm

Peso: 40 g

Motor

Fabricante - Tipo (KV): SunnySky X3508S-380 (380)

Corriente sin hélice: 0.1 A @ 10 V

Resistencia: 0.28 Ohm

Longitud caja: 27 mm

Peso: 106 g

Hélice

Tipo de hélice: APC Electric E

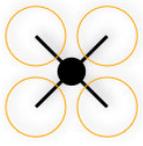
Diámetro: 14 inch

Peso: 355.6 mm

número de palas: 2

Const.de PotenciaEmpuje: 1.08 / 1.0

Gear Ratio: 1 : 1








Carga: 7.97 C

Tempo de vuelo estacionario: 22.3 min

Potencia eléctrica: 251.3 W

Temperatura ext.: 47 °C

Empuje-Peso: 2.2

Empuje específico: 8.32

Observaciones:

Batería	Carga:	7.97 C
	Voltaje:	21.11 V
	Tensión nominal:	133.2 Wh
	Energía:	6000 mAh
	Capacidad total:	5100 mAh
	Capacidad usada:	6.4 min
	Tiempo min de vuelo:	15.6 min
	Tiempo medio de vuelo:	22.3 min
	Tiempo de vuelo estacionario:	852 g
	Peso:	30.1 oz

Motor a eficiencia óptima	Corriente:	3.13 A
	Voltaje:	21.89 V
	Revoluciones*:	7956 rpm
	Potencia eléctrica:	68.5 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Eficiencia:	91.5 %

Motor @ Hover	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura ext.:	47 °C
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.13 A
	Voltaje:	21.89 V
	Revoluciones*:	7956 rpm
	Potencia eléctrica:	68.5 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Eficiencia:	91.5 %

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Motora a eficiencia óptima	Corriente:	3.44 A
	Voltaje:	21.86 V
	Revoluciones*:	3961 rpm
	Acelerador (log):	42 %
	Acelerador (lineal):	56 %
	Potencia eléctrica:	75.1 W
	Potencia mecánica:	62.7 W
	Potencia-Peso:	122.1 W/kg
	Eficiencia:	81.9 %
	Temperatura est.:	117 °F

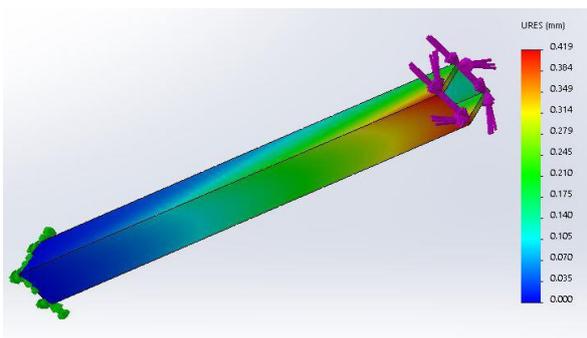
Motor al Máximo	Corriente:	11.96 A
	Voltaje:	21.01 V
	Revoluciones*:	6604 rpm
	Potencia eléctrica:	251.3 W
	Potencia mecánica:	205.7 W
	Potencia-Peso:	402.0 W/kg
	Eficiencia:	182.3 W/lb
	Temperatura ext.:	81.9 °C

Mot

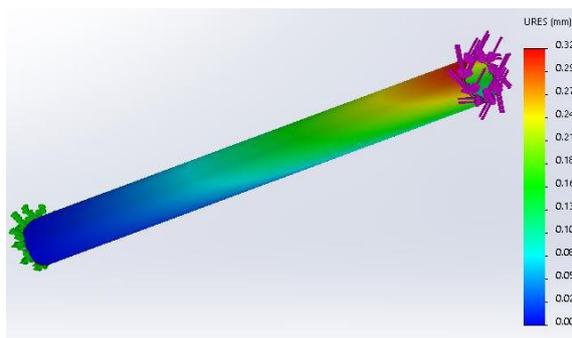
3. FICHA DE DATOS DEL MOTOR V3508 380

Specifications		V3508	推荐多旋翼重量《720g×轴数			
Stator Diameter		35mm	定子外径			
Stator Thickness		8mm	定子厚度			
No. of Stator Arms		12	定子槽数			
No. of Stator Poles		14	定子极数			
Motor Kv		380	电机KV			
No-Load Current (A/10V)		0.1A	空载电流			
Motor Resistance		0.28Ω	电机电阻			
Max Continuous Current		15A/30S	最大连续电流			
Max Continuous Power		320W	最大连续功率			
Weight		106g	重量 (含长线)			
Outside Diameter		42mm	转子直径			
Shaft Diameter		3.175mm	出轴直径			
Body Length		25.5mm	电机长度			
Overall Shaft Length		33mm	电机含轴总长度			
Max Lipo Cell		6S	最大电池节数			
Recommended Prop(inch)		APC11x4.7	APC1447	DJI1555	推荐螺旋桨规格	
Prop (inch)	Volts (V)	Amps (A)	Thrust(g)	Watts (W)	Efficiency (g/W)	全油门负载温度
APC1147	22.2	1	260	22.2	11.71171171	46°
		2	450	44.4	10.13513514	
		3	600	66.6	9.009009009	
		4	700	88.8	7.882882883	
		5	830	111	7.477477477	
		6	930	133.2	6.981981982	
		7	1030	155.4	6.628056628	
		8.4	1180	186.48	6.327756328	
APC1238	22.2	8.6	1200	190.92	6.285355123	50°
		1	270	22.2	12.16216216	
		2	450	44.4	10.13513514	
		3	610	66.6	9.159159159	
		4	740	88.8	8.333333333	
		5	870	111	7.837837838	
		6	940	133.2	7.057057057	
		7	1050	155.4	6.756756757	
APC1447	22.2	8	1150	177.6	6.475225225	70°
		10.6	1390	235.32	5.906850246	
		11	1440	244.2	5.896805897	
		1	310	22.2	13.96396396	
		2	490	44.4	11.03603604	
		3	630	66.6	9.459459459	
		4	770	88.8	8.671171171	
		5	910	111	8.198198198	
		6	1040	133.2	7.807807808	
		7	1140	155.4	7.335907336	
		8	1240	177.6	6.981981982	
		9	1320	199.8	6.606606607	
DJI1555	22.2	10	1420	222	6.396396396	72°
		12	1570	266.4	5.893393393	
		14.2	1830	315.24	5.805100876	
		1	320	22.2	14.41441441	
		2	510	44.4	11.48648649	
		3	650	66.6	9.75975976	
		4	790	88.8	8.896396396	
		5	920	111	8.288288288	
		6	1050	133.2	7.882882883	
		7	1160	155.4	7.464607465	
		8	1250	177.6	7.038288288	
		9	1350	199.8	6.756756757	
10	1430	222	6.441441441			
12	1580	266.4	5.930930931			
14.4	1860	319.68	5.818318318			

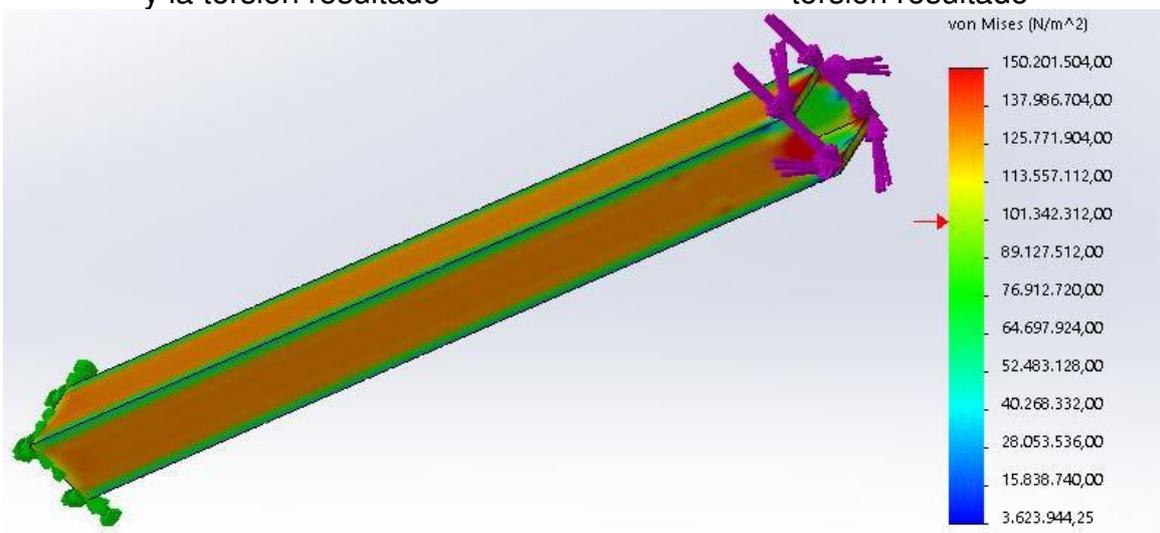
4. SELECCIÓN PERFILES



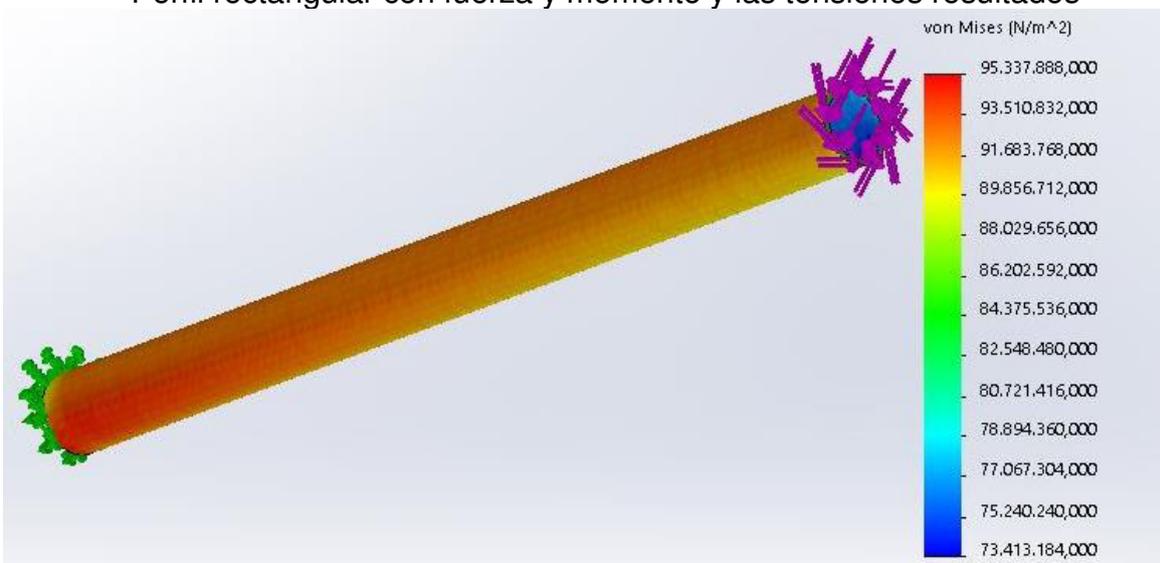
Perfil rectangular con fuerza y momento y la torsión resultado



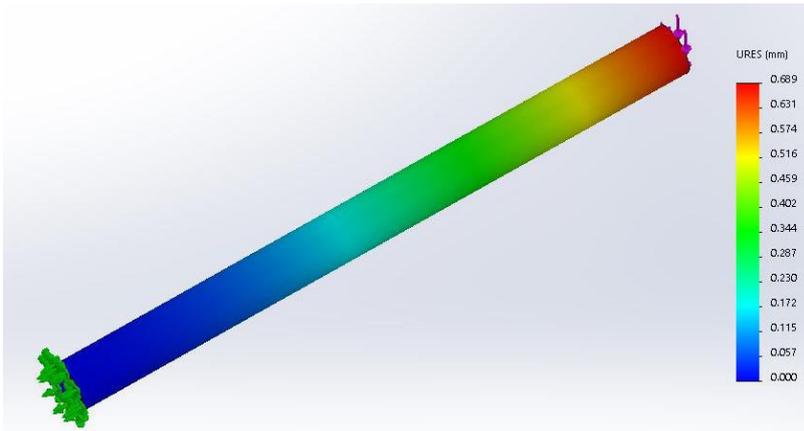
Perfil redondo con fuerza y momento y la torsión resultado



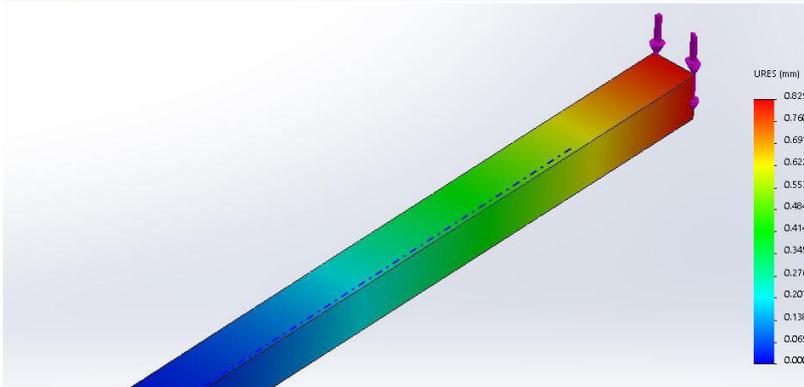
Perfil rectangular con fuerza y momento y las tensiones resultados



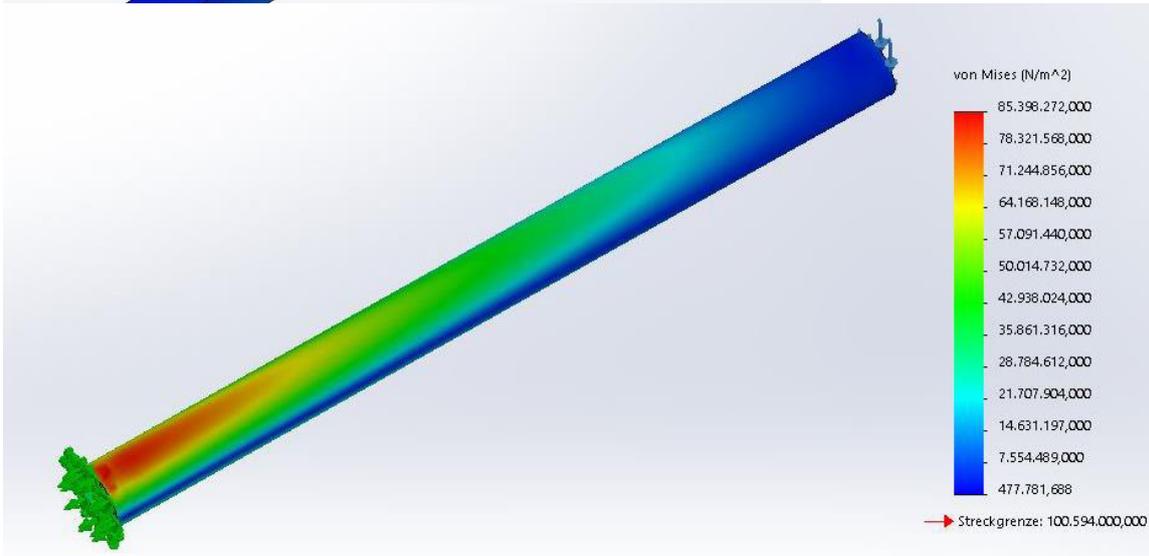
Perfil redondo con fuerza y momento y las tensiones resultados



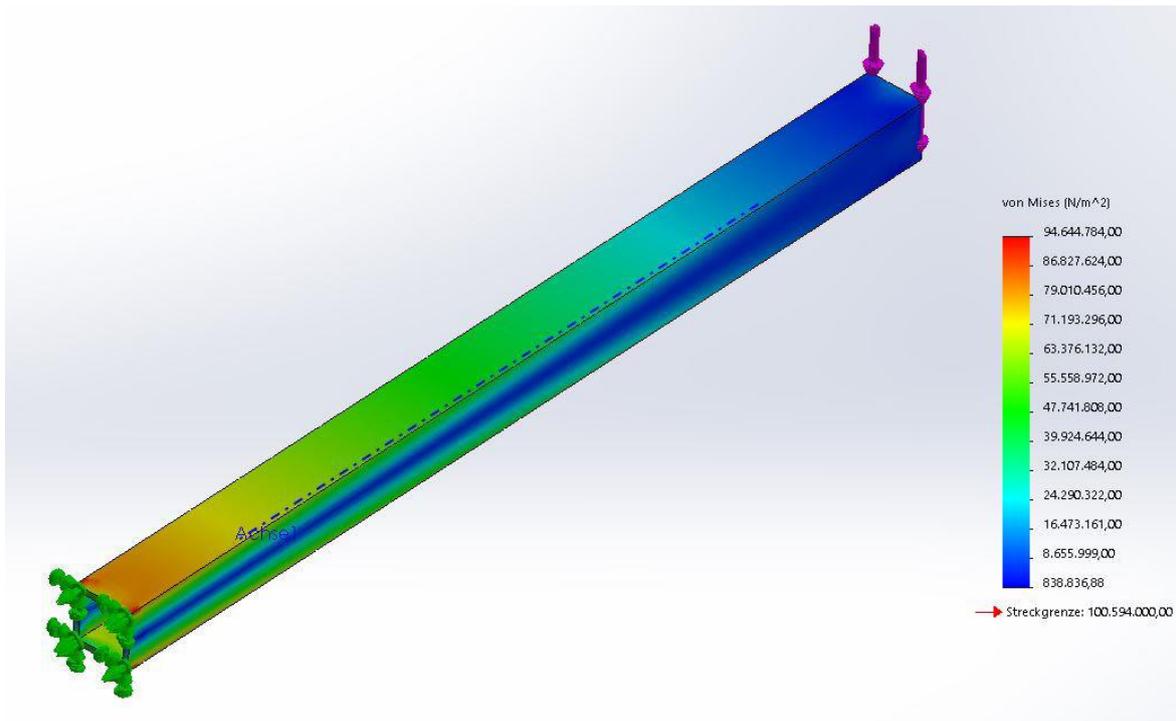
Perfil redondo con fuerza y las flexiones resultantes



Perfil rectangular con fuerza y las flexiones resultantes



Perfil redondo con fuerza y las tensiones resultantes



Perfil rectangular con fuerza y las tensiones resultantes

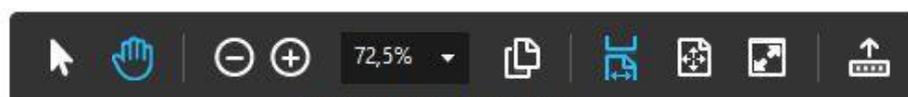
Programa	Solid Works 2017
Material	DIN hierro 0.6010 (EN-GJL-100)
Fuerza	15 N
Momento	10 Nm

5. VALORES CARACTERÍSTICOS DE LOS TUBOS

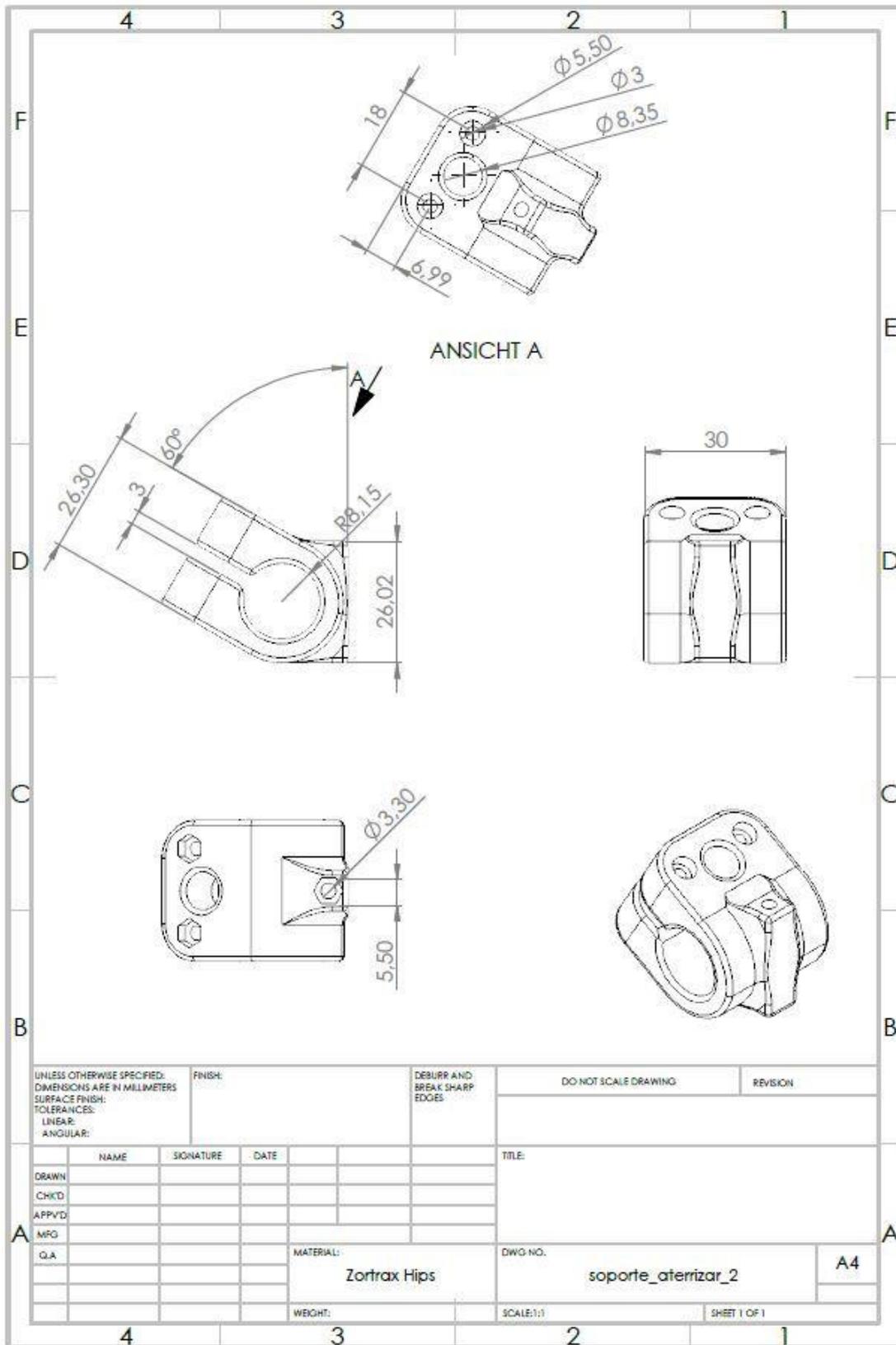
Características generales

*Densidad:	1.60 g/cm
*% de FC/Epoxi:	65/35%
*Resistencia a tracción:	600 MPa
*Resistencia a compresión:	570 MPa
*T° de uso max.:	90°
*T° de uso min.:	No tiene temp. min.
*Coeficiente de Expansión Térmica - Longitudinal:	$\times 10^{-6} \text{ K}^{-1} 0,1$
*Fracción de Volumen de las Fibras:	% 60-65
*Módulo de Young - Longitudinal:	GPa 110-120

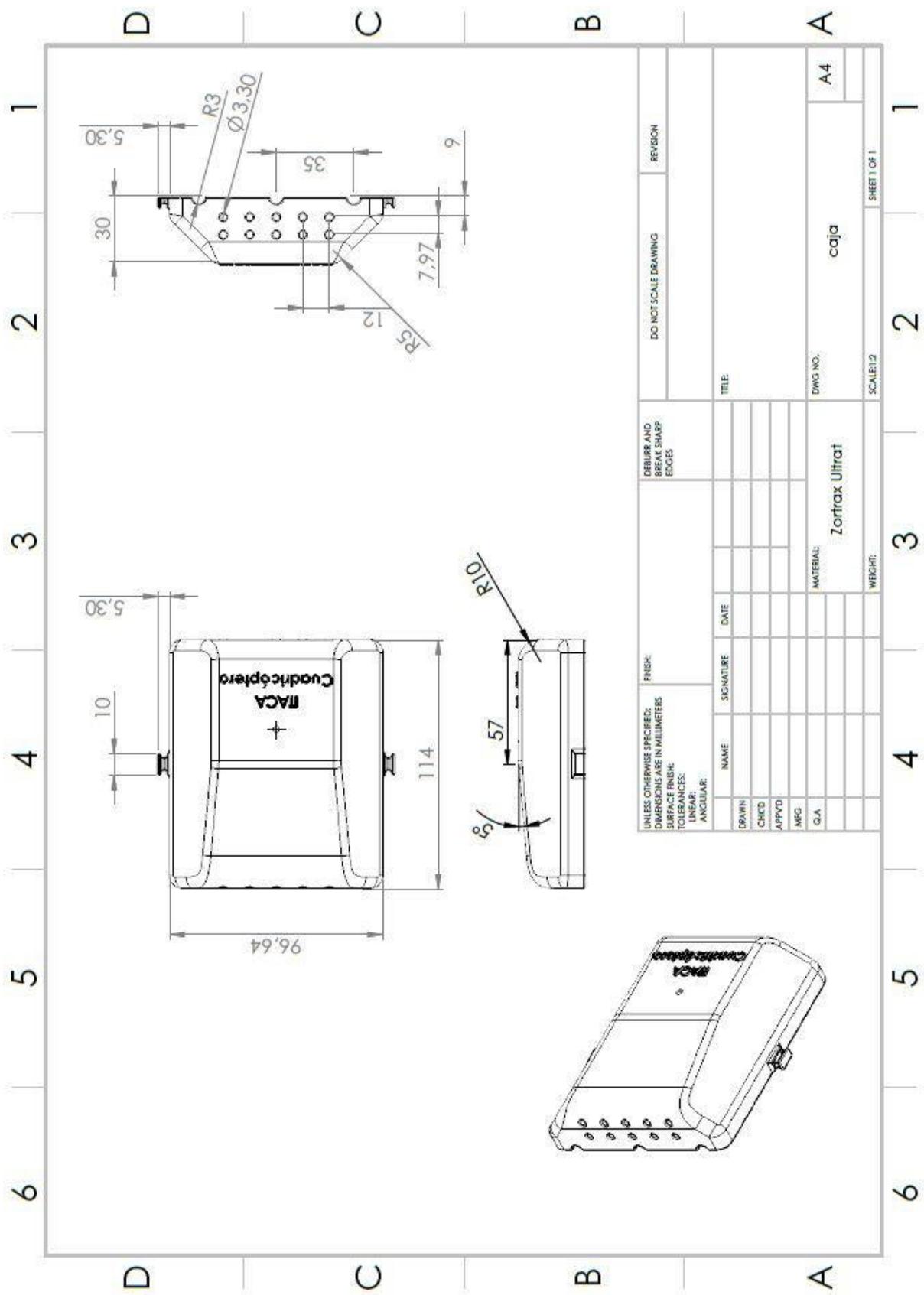
Diámetro (mm)	Peso (Kg/m)
8x10	0.04
18x20	0.08
28x30	0.13
38x40	0.18



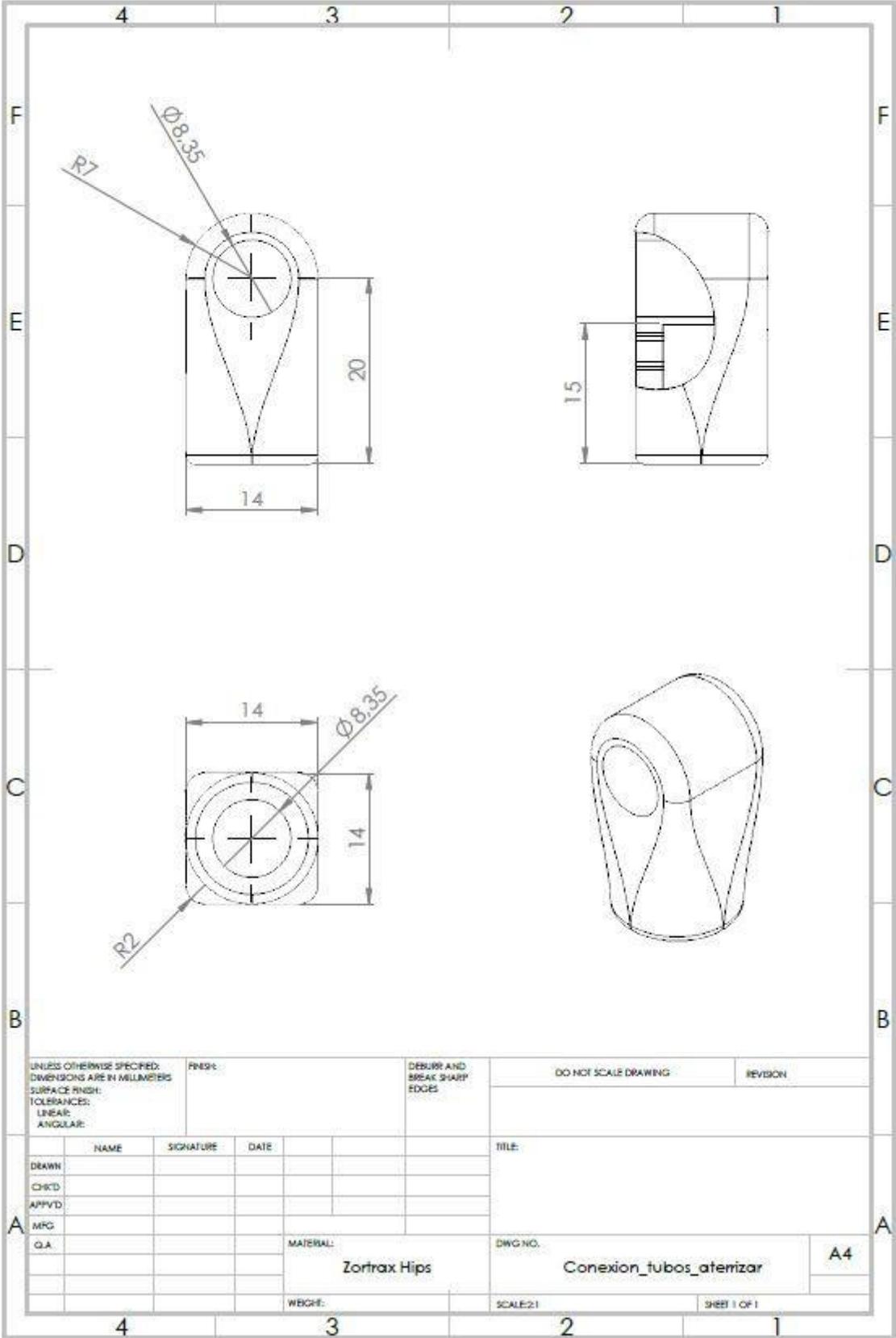
8. SOPORTE ATERRIZAR



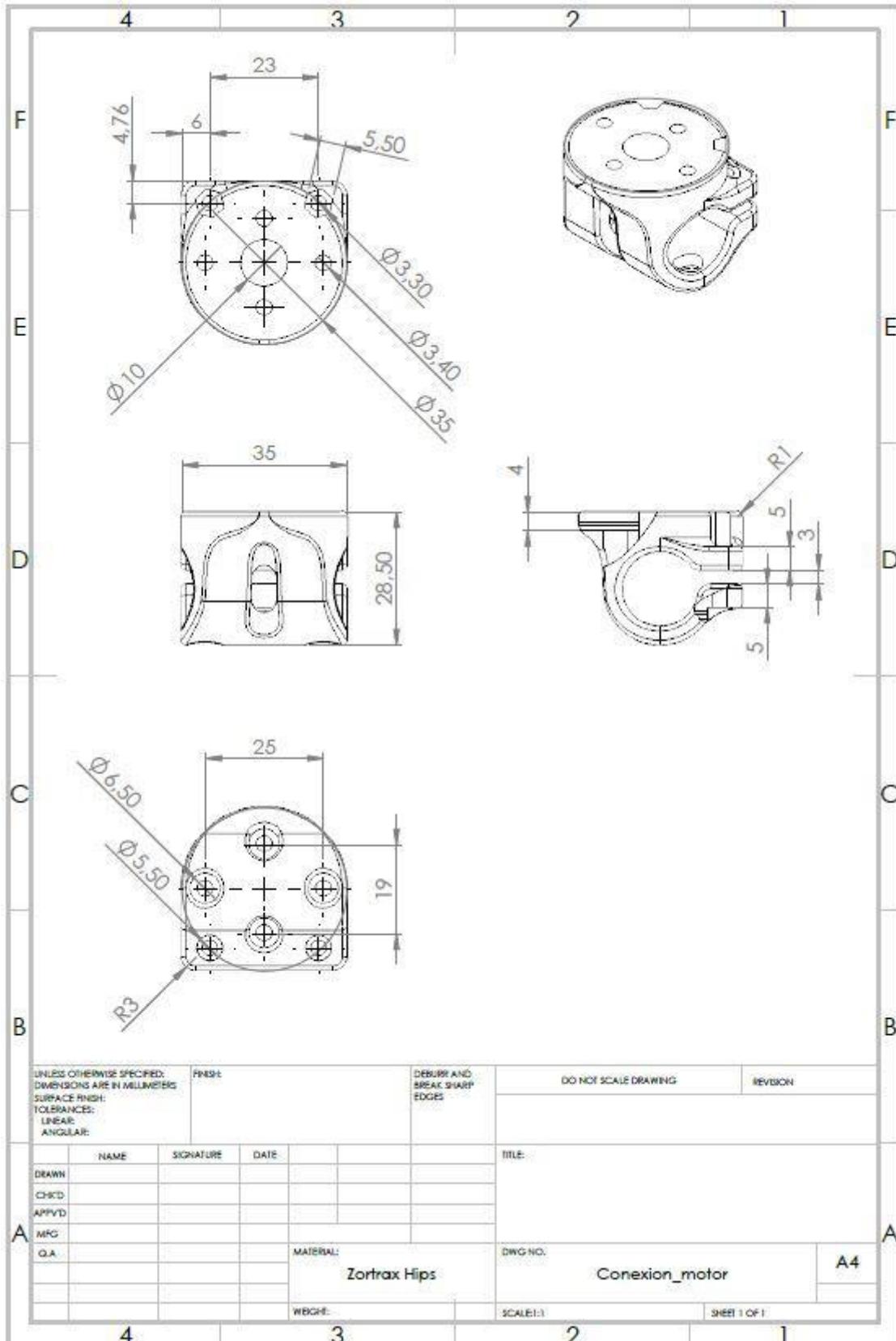
9. CAJA



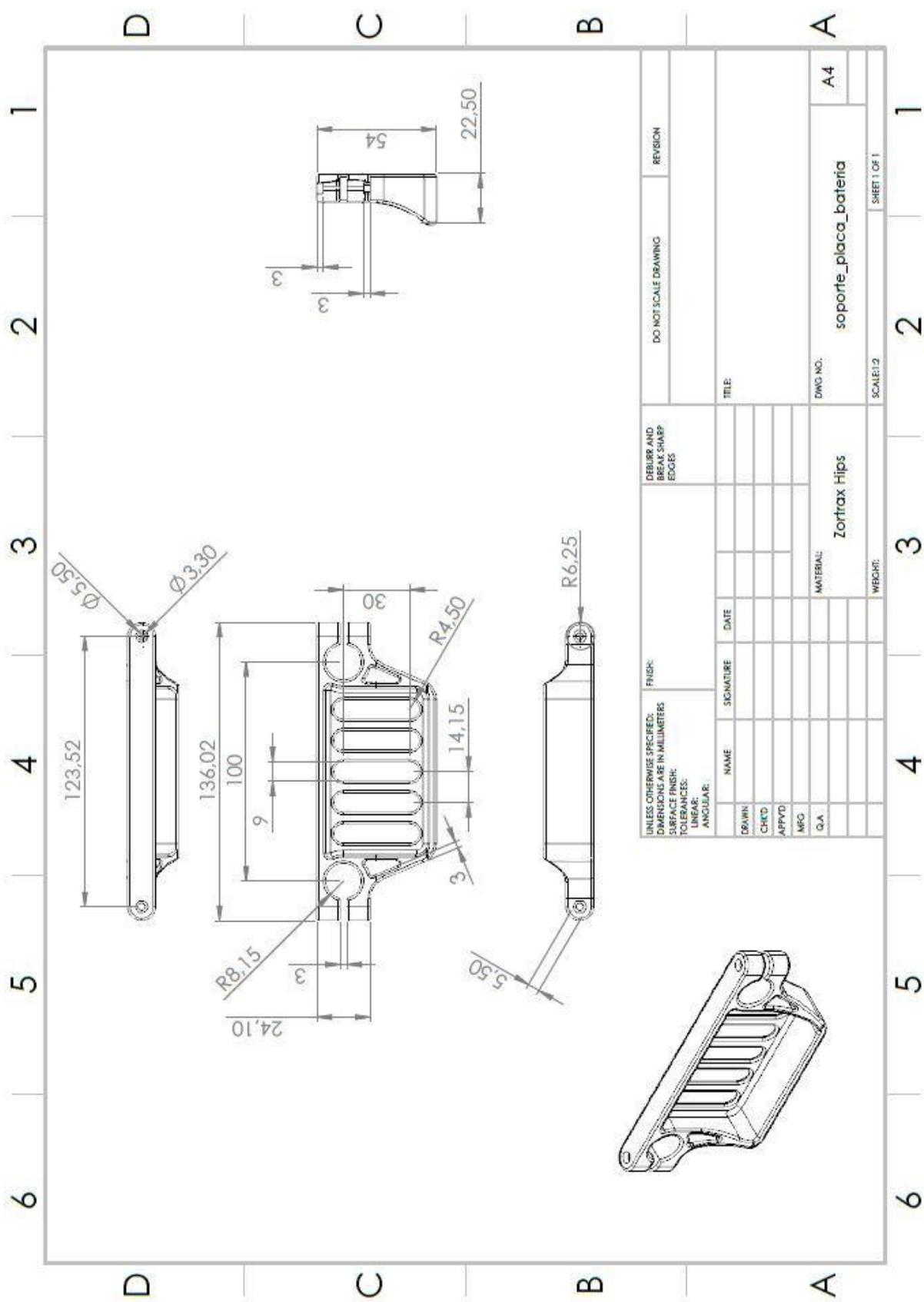
10. CONEXIÓN TUBOS ATERRIZAR



11. CONEXIÓN MOTOR



12. SOPORTE PLACA BATERÍA



13. CAPERUZA

