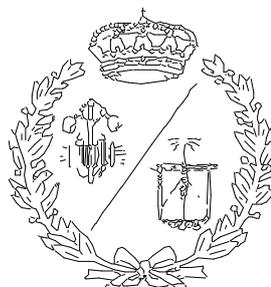


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Máster

**DISEÑO DE UN DRONE PROGRAMABLE
DE BAJO COSTE
(LOW COST PROGRAMABLE DRONE
DESIGN)**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERIA INDUSTRIAL**

**Autor: Juan Nistal Lastra
Octubre – 2017**

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO I. MEMORIA.....	4
DOCUMENTO II. ANEXOS.....	26
DOCUMENTO III. PLANOS.....	94
DOCUMENTO IV. PLIEGO DE CONDICIONES.....	106
DOCUMENTO V. MEDICIONES.....	114
DOCUMENTO VI. PRESUPUESTO.....	118
DOCUMENTO VII. BIBLIOGRAFÍA.....	128

DOCUMENTO I

MEMORIA DESCRIPTIVA

ÍNDICE DEL DOCUMENTO I. MEMORIA

1.- Objetivo del Proyecto.....	9
2.- Alcance del proyecto.....	9
3.- Antecedentes de los drones.....	10
4.- Requisitos y restricciones de Diseño.....	12
5.- Análisis de soluciones.....	13
6.- Justificación de la elección tomada.....	17
7.- Planificación del Proyecto.....	19
7.1.- Diseño y Análisis.....	19
7.2.- Etapas.....	20
7.3.- Diagrama de Gantt.....	22
8.- Programación.....	23
9.- Resumen del Presupuesto.....	24

Glosario / Definiciones

Android

Sistema operativo utilizado con frecuencia en dispositivos móviles, tablets,... está basado en el Kernel de Linux.

Arduino

Consiste en una plataforma electrónica de libre uso para la generación de prototipos que utilizan software y hardware flexible e intuitivo.

ESC (Variadores)

Elemento que se encarga de transmitir una señal PWM transformándola a señal trifásica para los motores.

IOS

Sistema operativo clásico utilizado por productos de Apple.

PWM

También conocido como la modulación por ancho de pulsos de una señal o fuente de energía para controlar la transmisión y cantidad de energía que se envía a una carga.

RC

Hace referencia al sistema de radio control que se utiliza para controlar el dron.

ABS

Son las siglas de Acrilonitrilo butadieno estireno. Es un plástico muy resistente utilizado en impresoras 3D para generar piezas de alto rendimiento para los drones.

PLA

Poliácido Láctico es un polímero con características similares a las del PET, biodegradable, y que se utiliza para impresión 3D también.

PET

Conocido como Tereftalato de polietileno, es un plástico generalmente utilizado en envases de bebidas y textiles.

PID

Nombre que se le da a los controladores utilizados para regular un sistema. Son las siglas que corresponden a Proporcional, Integrador y Derivativo.

Pitch

Da nombre al movimiento lineal del dron, que va hacia adelante y hacia atrás.

Roll

Movimiento lateral del cuadricóptero. Sin giro de este, solo un desplazamiento lateral.

Yaw

Rotación respecto de la vertical. Es el movimiento que nos hace cambiar la dirección de la parte frontal del cuadricóptero.

Throttle

Desplazamiento vertical. Movimiento producido por aumentar y reducir la potencia otorgada por los motores.

UAV

Son las siglas de las palabras Unmanned Aerial Vehicle que significa, vehículo aéreo no tripulado.

USB

Puerto de conexión típico de los ordenadores. Son las siglas de Universal Serial Bus (serie de bus universal).

Python

Lenguaje de programación cuya filosofía hace incapie en que el código sea legible y con una sintaxis sencilla.

C

Es un lenguaje orientado a la implementación de Sistemas Operativos, concretamente Unix. C es apreciado por la eficiencia del código que produce y es el lenguaje de programación más popular para crear software de sistemas, aunque también se utiliza para crear aplicaciones.

1.- OBJETIVO DEL PROYECTO

En este proyecto de fin de máster se ha realizado el diseño de un dron o cuadricóptero (helicóptero de 4 hélices) programable y de bajo coste. Este dispondrá de la capacidad de insertar o modificar los programas de control internos para un movimiento autónomo sin necesidad de actuación externa. También dispondrá, en el caso de que se quiera, de la capacidad de interconectarse con otros drones similares para la realización de enjambres de drones o movimientos en grupo coordinados.

Para concluir, con los materiales y elementos escogidos, se realizará un presupuesto para comprobar si compensa económicamente la construcción de un cuadricóptero casero o por el contrario, será mejor comprar uno.

2.- ALCANCE DEL PROYECTO

El proyecto consta del diseño y la construcción de un cuadricóptero programable. Se hará uso de materiales comprados directamente en tienda y otros contruidos de manera autónoma. Todos los materiales requieren un estudio de peso, coste y resistencia debido a que no todos los componentes tienen un mismo aguante. Además el obtener materiales ligeros proporcionará una mayor duración en el vuelo.

El diseño estructural se llevará a cabo observando diseños de otros drones del mercado y prototipos existentes. Una variedad de estos cuadricópteros analizados vienen recogidos en el Anexo de los “Estudios de Mercado”.

Posteriormente se hace un estudio de componentes electrónicos necesarios para la implementación de un dron. Entre ellos se encuentran el ordenador de abordo, los controladores de vuelo, variadores, baterías, motores,... Algunas de las comparativas más habituales del mercado se analizan en el Anexo de “Diseño y elección del hardware”.

Además de la parte física y de componentes, otra parte que tiene un gran peso en el proyecto, es la correspondiente a la programación interna del ordenador de abordo y del controlador de vuelo. Escogida la Raspberry Pi como ordenador de abordo y a la Naze 32 como controlador de vuelo del dron (Anexo de Diseño y elección del hardware), toca transmitir al multicoptero las instrucciones deseadas. Para ello es necesario conectar el ordenador al controlador de vuelo, programando las instrucciones correspondientes en la tarjeta micro SD de la Raspberry Pi. A su vez, se ha de dotar al controlador de valores adecuados para ajustar su PID interno, esto es debido a que en función del peso, forma y motores instalados se ajustará de diferente manera.

Finalmente hay que ver que pueda existir comunicación directa entre este dron y otros similares para el caso de querer realizar formaciones o movimientos coordinados de enjambres de drones (4 o más).

3.- ANTECEDENTES DE LOS DRONES

A día de hoy, el uso de los multicopteros está creciendo de manera exponencial. El empleo de robots voladores para desempeñar diferentes funciones del día a día va tomando gran importancia. Entre estas utilidades destaca el uso de los drones para la captura de fotos y videos aéreos. Además la posibilidad de añadir gran cantidad de hélices, otorga una mayor estabilidad durante el vuelo.

Dado que son elementos modernos que se encuentran en auge, es necesario conocer ciertos puntos importantes acerca de ellos:

1. A pesar de encontrarse normalmente con una gran variedad de estructuras o elementos diferentes que se pueden adaptar para cualquier cliente, existen también multicópteros fabricados en serie.
2. Como se comentó con anterioridad, la posibilidad de añadir una mayor cantidad de hélices, otorga una mejor capacidad de estabilización, siendo el mínimo recomendado de cuatro hélices.
3. Usan emisoras similares a los coches y barcos RC habituales para su manejo.
4. Disponen de la posibilidad de transmitir imágenes desde la cámara de abordo a escritorios remotos.
5. Su capacidad de carga puede superar los 2 Kg.
6. El tiempo de vuelo de un dron varía en función de las baterías que este posea, así como del peso total de este y de su carga correspondiente.
7. Los elementos constructivos básicos son aluminio, fibra y plástico dotándoles de una relación resistencia-peso adecuada.
8. Se les suele acoplar un GPS para conocer de manera más exacta su posición.

9. El GPS mejora los vuelos autónomos, ya que dota al dron de un conocimiento más preciso de sus coordenadas.

10.No se puede hablar de un precio en concreto debido a que en función de los motores, material, número de hélices, etc, podemos encontrar valores desde 600-9.000€.

Los multicopteros se pueden clasificar según su posición de los brazos y el tipo de movimiento de tres maneras: En “X”, donde dos de los rotores proporcionan el avance; en “Y”, sería igual que el “X” pero con solo un brazo trasero; y en “+”, cuando un brazo va delante y otro detrás.

4.- Requisitos de Diseño

Como cabe esperar, a la hora de diseñar un prototipo hay ciertas restricciones o requisitos que son necesarios tener en cuenta para conseguir un diseño óptimo y competitivo en el mercado.

El primero de los requisitos a tener en cuenta a la hora de diseñar un dron, es dotarlo de la capacidad de ser **autónomo**. El multicoptero dispone de una tarjeta de memoria en la cual se pueden programar diferentes movimientos u órdenes para hacer que el cuadricóptero los lleve posteriormente a cabo. La capacidad de disponer hoy en día de un dron programable barato es muy baja, de ahí que se quiera dar esta propiedad al diseño.

Otra característica importante para competir en el mercado es la del **tiempo de vuelo**. El tiempo máximo que un dron puede encontrarse en suspensión a día de hoy ronda los 15 minutos. Este varía en función de la potencia desarrollada por los motores, es decir, usando los motores a un 100% de su potencia, el tiempo de vuelo se verá disminuido, mientras que si sólo se usa un 60%, éste aumentará considerablemente. Esto se puede ver en el Anexo de “Cálculos”.

Una restricción encontrada a la hora de diseñar el prototipo es **el peso**. Esto es debido a que los motores tienen un límite a la hora de levantar cierta cantidad de masa. Algunos tienen mayor potencia que otros, pero todos tienen su límite. Con esto hay que tener en cuenta que, al diseñar un cuadricóptero, es importante disminuir al máximo el peso total del dron. Se podría también conseguir aumentando la potencia de los motores, pero en este caso el coste total aumentaría, lo cual no interesa tanto.

Por último, un factor imprescindible que va de la mano con el peso, es la **resistencia mecánica y a fatiga** de los materiales. Existen gran cantidad de materiales baratos y de bajo peso, sin embargo muchos de estos materiales no servirían debido a que su resistencia mecánica no es la adecuada. Por ejemplo, se podría usar para las crucetas una base de madera, sin embargo, a pesar de ser ligera y barata, aguantarán mejor la fatiga producida por los motores si estas fueran de fibra de carbono. La selección de materiales se puede encontrar en el Anexo I – “Diseño y elección del Hardware”.

5.- Análisis de Soluciones

Una vez conocidos los requisitos y restricciones hay que pasar a analizar las diferentes soluciones encontradas a la hora de diseñar el prototipo. Mediante el uso de los materiales y elementos del Anexo I – “Diseño y elección de Hardware”, se obtienen una serie de alternativas de las cuales luego se escogerá la más adecuada.

Como se pudo ver en el apartado anterior, existen 4 variables importantes a tener en cuenta en función de los materiales, a la vez que se busca, como quinta condición, el menor coste posible.

Autonomía	Tiempo Vuelo
Peso	Resistencia

La primera de las soluciones obtenida con estos 4 parámetros sería con una placa Arduino como ordenador de abordo y un Razor como controlador de vuelo. Las Baterías que se instalan en esta solución son 2 baterías de 2200mAh que le proporcionan, acompañado de 4 motores de Emax CF2822, un tiempo de vuelo estimado de 10 minutos. La estructura está formada por una base y soporte de aluminio, una tapa de PVC transparente y unas crucetas de Fibra de carbono, sin embargo al trabajar con Arduino los elementos electrónicos internos aumentan en cantidad, otorgando un peso total de poco más de 1,7 Kg. Por último los materiales utilizados en las zonas críticas de las crucetas, al ser de fibra de carbono tienen una excelente resistencia mecánica y a fatiga.

Autonomía (Programación Aceptable)	Tiempo Vuelo (10 min)
Peso (1,7Kg)	Resistencia (Aceptable)

Teniendo en cuenta las características anteriormente mencionadas, se llega a una solución del cuadricóptero muy buena con una capacidad de programación aceptable, sin embargo la mayor parte no dispone de tarjeta SD donde introducir el programa deseado. Se podría controlar desde un elemento externo (ya sea ordenador o mando RC), pero para un control autónomo serían necesarios algunos elementos extra. El peso y tiempo de vuelo, así como la resistencia física de los materiales serían lo suficientemente buenas.

La segunda alternativa que se barajó fué modificando el “cerebro” del dron e introduciendo en su lugar una Raspberry pi con un controlador Naze 32. El resto de elementos serían los mismos: materiales resistentes, tiempo de vuelo aproximadamente igual y un peso muy similar.

Autonomía (Programación Buena)	Tiempo Vuelo (10 min)
Peso (1,6Kg)	Resistencia (Aceptable)

En este caso, el ordenador de abordo Raspberry Pi tiene la capacidad de intercambiar la tarjeta SD que contiene los programas (con el sistema operativo correspondiente) en el momento deseado y con gran facilidad. Por otro lado el peso disminuye ligeramente aunque es tan poco que apenas varía con el caso anterior.

Una **tercera** variación es cambiando los materiales de construcción. En este caso se hará uso de la Raspberry Pi y el controlador de vuelo Naze, sin embargo, el material empleado será la madera de pino y ABS (polímero que utilizan las impresoras 3D). Estos materiales dotan al dron de una ligereza extrema, ya que no pesa tanto como el aluminio y la fibra de carbono. Además al utilizar los mismos motores, se obtiene un ahorro en las baterías empleadas, lo cual otorga una mayor facilidad de elevación con menor potencia.

Autonomía (Programación Buena)	Tiempo Vuelo (13 min)
Peso (1,1Kg)	Resistencia (Baja)

Como se explicó anteriormente, la disminución de peso proporciona un ligero aumento en la duración del vuelo. Además al ser materiales más baratos como la madera de pino, se consigue reducir el coste. Sin embargo, este tipo de materiales no da mucha fiabilidad a largo plazo en cuanto a resistencia mecánica y a fatiga, es decir, a corto plazo podría servir, pero a largo plazo se producirían fallos y roturas indeseadas.

Como **cuarta** opción se han utilizado baterías mayores para conseguir, en este caso, un aumento en la capacidad y durabilidad del vuelo. Esta vez, los materiales vuelven a ser aluminio y fibra de carbono para dotar al prototipo de resistencia mecánica. Además la parte de programación consiste de nuevo en una Raspberry Pi y un Naze32 como controlador.

Autonomía (Programación Buena)	Tiempo Vuelo (15 min)
Peso (1,9Kg)	Resistencia (Aceptable)

Sin embargo en esta opción se encuentran un par de factores perjudiciales. Al hacer uso de baterías más potentes, o en su defecto mayor cantidad de ellas, se aumenta el peso y el coste del prototipo considerablemente. Esto provoca que al aumentar el peso total también se disminuya el tiempo de vuelo (aunque en menor medida). Además el precio de las baterías es bastante elevado, lo suficiente para que el simple hecho de buscar mayor mAh, o una mayor cantidad de ellas, provoque un aumento indeseado de precio.

6.- Justificación de la elección tomada

Debido al elevado precio de los cuadricópteros en el mercado, y a pesar de existir algunos como el Parrot AR-Drone, cuyo precio es relativamente bajo, se realiza un cuadricóptero programable de bajo coste. La idea es intentar reducir, de la mejor manera posible, el coste de estos. Para esto se realiza un multicoptero con los elementos más básicos que cumplan la función deseada y que a su vez, no incrementen en gran medida el coste total y final del dron.

Dado que interesa disponer de la posibilidad de realizar un enjambre de drones (4 o más), realizar un dron de bajo coste proporciona la capacidad de obtener una mayor cantidad de multicopteros a precios más reducidos.

Por esto para la construcción del cuadricóptero se dispondrá de una Raspberry Pi como ordenador de abordo y una Naze32 como microcontrolador. Ambos elementos indispensables para su implementación. También se hará uso de unos Variadores (ESC) de 25 A para transformar la salida del naze32 a una señal entendible por los motores. Estos motores y las hélices a las que mueven, varían en función del peso final del cuadricóptero, datos que se calcularán en el Anexo de “Cálculos”. Además, las baterías que alimenten los motores dependerán también de los motores escogidos.

En cuanto a los materiales, como se menciona con anterioridad, existen elementos de construcción con aluminio, otros con fibra de carbono y una tapa de PVC transparente. Para finalizar, dos baterías de 2200mAh que proporcionan cerca de 10 minutos de vuelo a una potencia de motores media. Por tanto se escogió **la segunda** de las alternativas que se vieron anteriormente.

Autonomía (Programación Buena)	Tiempo Vuelo (10 min)
Peso (1,6Kg)	Resistencia (Aceptable)

7.- Planificación del Proyecto

7.1.- Diseño y Análisis

En primer lugar se partirá de la parte electrónica. Se realizará el diseño de hardware, donde tomará relevancia el microcontrolador y el ordenador de a bordo. Serán necesarios conocimientos de Python o de C para programar la Raspberry Pi (ordenador de a bordo) y que se comunique correctamente con el Naze32 (microcontrolador).

Una vez se tenga la comunicación entre estos elementos, conociendo sus dimensiones y peso, se pasará a la búsqueda de motores, transformadores de PWM a trifásico (ESC), hélices y el resto de componentes físicos que completarán el diseño físico del cuadricóptero.

A medida que se van realizando todos los pasos, habrá que fijarse en el precio de los elementos a utilizar, ya que se está diseñando un dron de bajo coste, y como su nombre indica, se busca realizarlo con el menor gasto económico posible.

7.2.- Etapas

Se distinguen en este proyecto del diseño de un dron de bajo coste tres etapas principales.

En primer lugar será necesario un periodo de estudio de mercado y evolución de los multicopteros. También es imprescindible adquirir conocimientos en mayor profundidad de los drones y sus elementos constructivos básicos para poder llevar a cabo su construcción con el menor coste posible. Posteriormente se pasa a una etapa de diseño. En esta se hará el diseño de todos los elementos físicos que componen un dron buscando su mayor resistencia y menor coste y peso. Además de diseñar una estructura de conexión básica de los elementos físicos y electrónicos para el correcto funcionamiento. Finalmente será necesaria la programación del código para la correcta comunicación del Raspberry Pi (Ordenador de abordo) con el Naze32 (Controlador de vuelo) para un funcionamiento óptimo.

PRIMERA ETAPA

Como se ha mencionado con anterioridad, la primera de las etapas requiere de un estudio de mercado completo para conocer el resto de drones disponibles. Será imprescindible el conocimiento básico de drones y su funcionamiento. Para poder pasar posteriormente a la etapa de diseño de los elementos principales y su construcción, se analizan los diferentes componentes internos del dron necesarios para su correcto funcionamiento. Esto es debido a que es necesario conocer los componentes a utilizar en la implementación para poder luego buscar un menor coste, con el mínimo peso y en un tamaño razonable.

SEGUNDA ETAPA

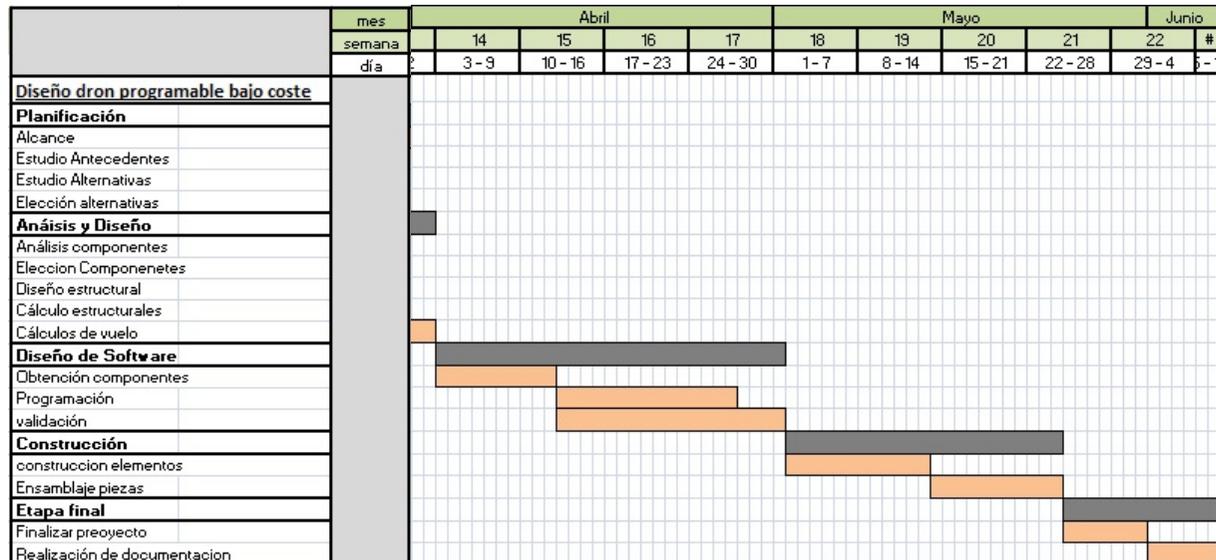
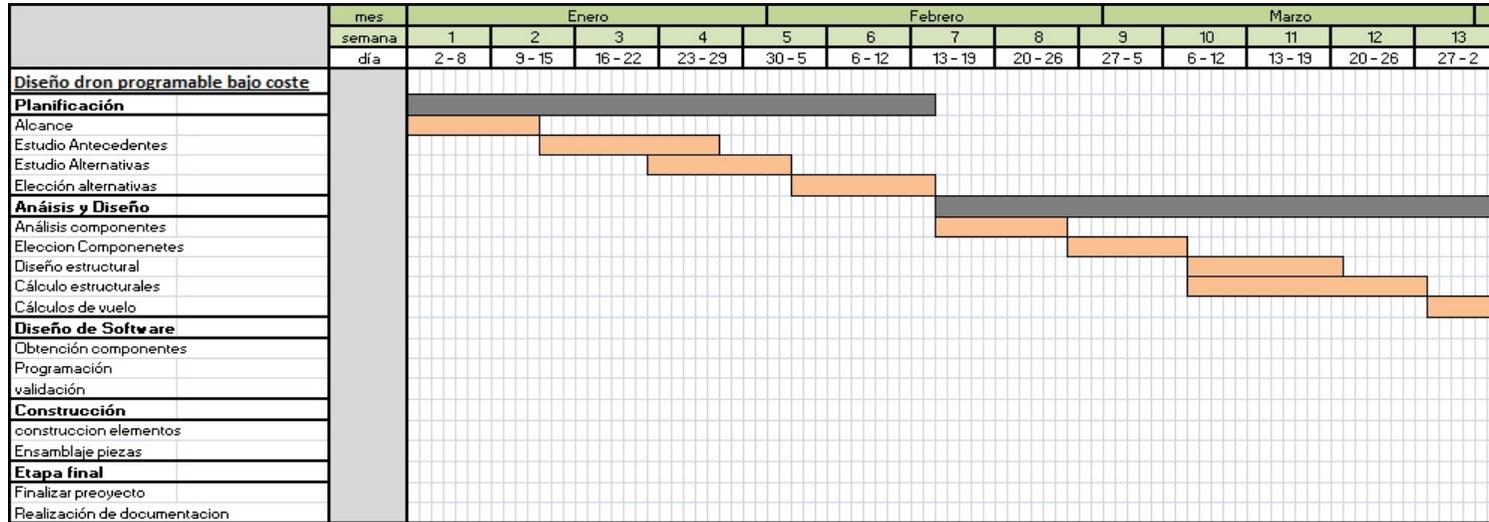
En esta etapa, el diseño físico incluirá tanto la construcción de elementos principales como la interconexión de los dispositivos internos. La conexión más importante será la que se realiza entre el ordenador de abordo (Raspberry Pi) y el controlador de vuelo (Naze32). Estos van conectados a través de un puerto USB y un MicroUSB. Una vez que se pueden conectar el controlador con el ordenador, será necesario tener el resto de componentes a implementar. Se hará uso de unos ESC (convertidores de PWM a trifásico) para poder conectar posteriormente los motores de las hélices de nuestro multirrotor. También habrá que poner las hélices correspondientes para que puedan levantar, a partir de la potencia suministrada por el motor, el peso total del cuadricóptero junto con cierta carga adicional.

Será necesaria una base de algún material ligero donde anclar las piezas y elementos a montar. También una carcasa resistente por si se saca a exterior, pero en caso de trabajar en interior, y para la facilidad en las modificaciones internas de nuestro dron no sería indispensable. Se añadirán las crucetas o brazos del cuadricóptero, donde se instalarán los motores junto con las hélices.

TERCERA ETAPA

En esta tercera y última etapa, una vez que se tiene la estructura básica del dron implementada con todo el hardware necesario, hay que realizar la parte del software. En este momento serán necesarios conocimientos de programación, en Python o en C principalmente, para poder transferir de manera más sencilla y efectiva, las órdenes del ordenador de abordo (RaspberryPi) y que sea éste el que las ejecute a través del Naze32 (microcontrolador de vuelo). La parte de programación es muy importante ya que le dará al dron la capacidad de ser autónomo.

7.3.- Diagrama de Gantt



8.- Programación

La parte de programación interna de los elementos electrónicos es una parte importante. Es necesaria la correcta comunicación entre el controlador de vuelo y el ordenador de abordo, que controlará y ejecutará las acciones. Para ello se realiza la conexión de la Naze32 (controlador de vuelo) con la Raspberry Pi (ordenador de abordo) a través de un cable USB y MicroUSB. Una vez se dispone correctamente de la conexión se procederá a la adaptación y calibración del controlador de vuelo desde la propia Raspberry Pi.

Una vez se obtiene la correcta calibración del controlador de vuelo habrá que proceder a obtener y guardar, a tiempo real, los datos del controlador de vuelo. Se desarrollarán para ello, una serie de programas en la Raspberry Pi que, a través del puerto de conexión USB, recojan los valores de giros, altura, inercias y aceleraciones que mide el controlador de vuelo, para que luego se puedan utilizar durante el vuelo del dron, ajustar los controladores de estabilidad, ajustar movimientos y velocidades de giros,...

Una vez se consiguen obtener los datos procedentes del controlador de vuelo, se simulan y representan los movimientos para observar si las unidades y valores que se analizan son correctos. Esto es debido a que si no partimos de resultados más o menos exactos, las posiciones que tendría el cuadricóptero podrían ser erróneas y sus desplazamientos serían inadecuados.

Cuando se dispone de una simulación acertada se pasa a la programación de los movimientos deseados a partir de todos los datos recogidos del controlador de vuelo. Por eso lo más importante será que se obtengan datos a tiempo real de los movimientos de este como se indicó en la primera parte del apartado.

Finalmente en el caso de querer realizar un enjambre con diferentes drones que se comuniquen entre ellos se hará uso de un programa que no solo recoja los valores de posición y movimiento del primer cuadricóptero, sino que lo mandará por bluetooth o a través de una red Wi-Fi a otra Raspberry.

El bluetooth tiene un alcance aproximado de unos diez metros sin obstáculos, por tanto para los vuelos en espacios reducidos se podría utilizar este método de transmisión, mientras que en caso de grandes espacios, de ser posible, se utilizará como medio de comunicación entre dos Raspberry Pi, una red Wi-Fi a la que se encuentren ambas conectadas. Si se quiere programar o modificar los códigos se puede utilizar el escritorio remoto de un ordenador portátil conectado por Wi-Fi a la misma red utilizando un programa llamado VNC Viewer.

9.- Resumen del Presupuesto

El Presupuesto final alcanzado se separa en tres capítulos. Estos capítulos se separan en materiales de adquisición directa, materiales de fabricación propia y mano de obra.

Los materiales de adquisición directa son aquellos que se obtienen directamente en una tienda, ya que es normalmente más barato este tipo de obtención que la fabricación individual de cada elemento. Además algunos de los componentes pueden no ser realizables por ciertas personas por falta de conocimientos o recursos. El coste de estos materiales alcanza el valor de trescientos cuatro euros con diez céntimos.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones

En segundo lugar se analizarán los costes de los materiales de construcción propia. Estos pueden variar en función de los materiales escogidos o los precios, en función del lugar de compra y cantidad. Los valores obtenidos son precios medios de material aprovechados lo máximo posible, obteniendo un coste de sesenta euros con ochenta y ocho céntimos.

Finalmente el coste de la mano de obra también aparecerá en el presupuesto. Es necesario para la realización de este proyecto por una persona con título de ingeniero o al menos conocimiento en muchas ramas diferentes: mecánica, electrónica, energética, visión espacial,... Ascendiendo el coste de mano de obra de una persona cualificada que dedique su tiempo en la realización de un proyecto de esta envergadura a ochocientos euros.

El presupuesto total al que se llega por contrata (contando con los gastos generales, beneficios e IVA) asciende al valor de mil seiscientos treinta y cinco euros con diecisiete céntimos. Este valor podrá variar si se varían los valores de los diferentes capítulos que se tienen para la realización de este proyecto.

DOCUMENTO II

ANEXOS

INDICE DE LOS ANEXOS

ANEXO 1.- Documentación de Partida.....	30
ANEXO 2.- Cálculos.....	38
ANEXO 3.- Estudio de Mercado.....	48
ANEXO 4.- Estudio de Componentes.....	52
4.1.- Diseño y elección del hardware.....	52
4.2.- Diseño y elección del software.....	74
4.3.- Diseño final.....	92

Índice Figuras

- FIGURA 1 - Dron milimétrico
- FIGURA 2 - Posiciones Naze32
- FIGURA 3 - Conexiones del motor (catálogo naze32)
- FIGURA 4 - Giro motores Dron (catálogo naze32)
- FIGURA 5 – Movimiento vertical
- FIGURA 6 - Movimiento Roll/Pitch
- FIGURA 7 - Movimiento Yaw
- FIGURA 8 - Motores Emax CF2822
- FIGURA 9 - FUERZAS Y MOMENTOS
- FIGURA 10 - DJI Phantom3
- FIGURA 11 - Airframe XM-6 Ti-QR
- FIGURA 12 - MK-Hexa-XL6
- FIGURA 13 - Parrot Ar Drone
- FIGURA 14 - Controlador Pixhawk
- FIGURA 15 - ALTIMU-10
- FIGURA 16 - RAZOR IMU 9DOF
- FIGURA 17 - Naze32 AcroFunFly
- FIGURA 18 - ARDUINO
- FIGURA 19 - Placa HummingBoard
- FIGURA 20 - Raspberry Pi
- FIGURA 21 - ALUMINIO
- FIGURA 22 - FIBRA DE CARBONO
- FIGURA 23 - FIBRA DE VIDRIO
- FIGURA 24 - ABS
- FIGURA 25 - PET
- FIGURA 26 - POLIESTIRENO
- FIGURA 27 - Hélices
- FIGURA 28 – ESC EMAX de 25A

- FIGURA 29 - Emisora TARANIS
- FIGURA 30 - Emisora Futaba
- FIGURA 31 - Tabla de movimientos del Quadcopter
- FIGURA 32 – Diseño PID Básico
- FIGURA 33 – Baseflight – Configurator
- FIGURA 34 - Calibración PID Baseflight
- FIGURA 35 – Simulación Comprobación Puerto
- FIGURA 36 - Naze32 - Configuración
- FIGURA 37 – Calibración Acelerómetro -
- FIGURA 38 - Roll, Pitch y yaw
- FIGURA 39 – Simulación Baseflight
- FIGURA 40 – Simulación Posición Baseflight
- FIGURA 41 – Representación Giros y Altura
- FIGURA 42 – Simulación Inercias
- FIGURA 43 – Representación Inercias
- FIGURA 44 – Simulación Posición Baseflight 2
- FIGURA 45 – Simulación Estabilización Motores
- FIGURA 46 – Esquema físico de los componentes

ANEXO 1.- Documentación de Partida

1.1.-Origen de los Drones

La aviación no tripulada tuvo sus comienzos en los modelos contruidos y volados por los inventores como Cayley, Stringfellow, Du Temple y otros pioneros de la aviación, que fueron previos a sus propios intentos de desarrollar aeronaves tripuladas a lo largo de la primera mitad del siglo XIX. Estos modelos sirvieron como bancos de pruebas tecnológicos para el posterior desarrollo de modelos de mayor tamaño con piloto a bordo y, en este sentido, fueron precursores de la aviación tripulada.

Las primeras aeronaves no tripuladas fueron construidas durante y justamente después de la primera guerra mundial. El primero fue el “Aerial Target” que data de 1916 (Blanco o diana aérea) controlado mediante radiofrecuencia AM baja para afinar la puntería de la artillería anti-aérea.

El desarrollo de los Drones fue de la mano del de los misiles como forma de guiar a los explosivos hacia un objetivo mediante seguimiento de este. De haberse llegado a un desarrollo más completo se podrían haber abatido más objetivos del tipo Zepelín.

En la aceptación más amplia del término, la aviación no tripulada abarca un amplio espectro de aeronaves. La genealogía de las aeronaves no tripuladas esconde sus raíces en el desarrollo de los llamados “torpedos aéreos”, antecesores de los actuales misiles crucero, que posteriormente se desarrollaron a través de las ramas de las bombas guiadas (no propulsadas), los blancos aéreos (llamados “drones” en la terminología anglosajona), los señuelos, los modelos recreacionales y/o deportivos de radio-control, las aeronaves de investigación, las aeronaves de reconocimiento, de combate, e incluso algunos modelos más extraños de vuelo extra-atmosférico.

El término vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle, UAV), se hizo común en los años 90 para describir a las aeronaves robóticas y reemplazó el término vehículo aéreo pilotado remotamente (Remotely Piloted Vehicle, RPV), el cual fue utilizado durante la guerra de Vietnam y con posterioridad.

El documento “JointPublication 1-02, Department of DefenseDictionary” editado por el ministerio de Defensa de los Estados Unidos define UAV como:

“Un vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo a un operador humano, utiliza las fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar autónomamente o ser tripulado de forma remota, que puede ser fungible o recuperable, y que puede transportar una carga de pago letal o no. No se consideran UAV a los misiles balísticos o semi-balísticos, misiles crucero y proyectiles de artillería».

Como podemos ver y como cabía esperar los inicios de los vehículos no tripulados tienen su origen en acciones militares. Información extraída de: <http://drones.uv.es/origen-y-desarrollo-de-los-drones/> y <http://mundrone.blogspot.com.es/p/historia-de-los-drones.html>

1.2.- Cuadricópteros y usos

Una vez que se conoce un poco el origen de los drones o vehículos no tripulados, se hablará de lo que corresponden a los cuadricópteros, tipo que se llevará a cabo en este proyecto.

En lo que respecta a los cuadricópteros, son helicópteros VTOL (VerticalTake-Off and Landing, “Despegue y aterrizaje vertical”), con 4 hélices/rotores para la propulsión. El término multirotor sería más genérico, abarcando no solo a los cuadricópteros sino también a los tricópteros, octocópteros y toda otra forma de helicópteros con un número mayor de 2 rotores.

Los primeros pioneros de hecho intentaron su primer vuelo utilizando multicópteros porque el uso de más de un rotor parecía la solución idónea para los problemas generados por los VTOL.

La experimentación de este tipo de vuelo dio comienzo hacia el 1907, donde Jacques y Louis Berguet, hermanos franceses, diseñaron, construyeron y probaron el Autogiro N°1, un cuadricóptero. Sin embargo, el diseño era muy pobre y poco práctico, resultando inestable a pesar de un buen despegue.

A medida que pasa el tiempo, se van haciendo cada vez más y más avances en la tecnología de los drones. Con los años se consigue una mayor eficiencia y un menor tamaño en estos drones. A través del estudio de animales e insectos voladores, se han desarrollado nuevas ideas y patrones de vuelo para solucionar ciertos problemas. Esto ayudará a que en un futuro se puedan solucionar estos problemas cuando los drones se encuentren en un escenario urbano y tengan un movimiento más completo y con una mayor capacidad de reacción.

Independientemente de la tarea asignada a los drones (tomar objetos, desplazarse con pesos, vuelos con turbulencias), se quiere conseguir que estos drones puedan realizar una gran cantidad de trabajos independientemente del entorno en el que se desplacen. Realizando tareas, desde búsqueda y rescate a vigilancia militar; incluso convirtiéndose en dispositivos móviles de comunicación con video vigilancia. Cualquier misión que se les mande requerirá de un control de vuelo espléndido.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones

Los avances con drones pequeños ya están dando sus frutos. Estos han sido utilizados en operaciones de reconocimiento y rescate en lugares con una accesibilidad reducida. Pero se cree que éstos podrían ser más eficientes si trabajaran en bandadas o enjambres de drones.

Se demostró la eficacia del algoritmo dirigiendo una bandada de nueve drones volando juntos siguiendo un vehículo en movimiento. Esto hace pensar que cada vez se está más cerca de conseguirlo.

Si por un lado se busca el movimiento colectivo para ser capaces de reconocer grandes extensiones de terreno, por otra parte se estudia el empleo de los drones de tamaño milimétrico. Este estudio se quiere utilizar en la exploración de espacios donde el espacio llega a ser tan reducido que apenas hay sitio para moverse. Este microrrobot posee ya grandes capacidades de vuelo durante periodos prolongados de vuelo.

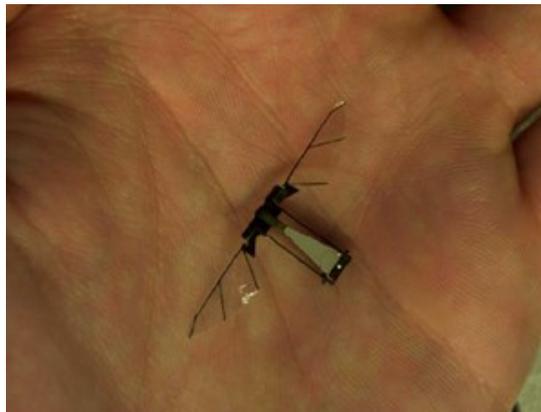


FIGURA 1 – Dron milimétrico (<http://conspiraciones1040.blogspot.com/2013/05/insectos-espias-mosquitos-robot.html>)

En un futuro no muy lejano, los drones de tamaño milimétrico podrían llegar a ser empleados para reconocimiento aéreo, polinización agrícola, incluso podrían servir como, en un futuro, modelos mecánicos para el estudio de vuelos de insectos. Una vez salen del laboratorio el reto es mucho mayor. Se enfrentan de manera directa a los elementos, el calor extremo, el frío, lluvias, tormentas,...

El principal problema meteorológico para los drones voladores serán los fuertes vientos racheados y cambiantes con grandes remolinos que se podría encontrar nuestro cuadricóptero durante su vuelo.

Otro de los puntos importantes que se estudian es el de reducir al mínimo, dentro de lo posible, la cantidad de energía requerida para el desplazamiento de un punto a otro. Un método práctico para el ahorro de energía es el crear un robot capaz de saltar o de planear, cualidades que podrían tener animales como la ardilla voladora o peces voladores.

En conclusión, los investigadores creen que estos tipos de robot pueden ser usados perfectamente en operaciones de búsqueda y rescate haciendo ínfimo su uso de energía y ofreciendo ciertas ventajas que un robot terrestre normal no podría dar. Las prestaciones obtenidas con los drones voladores son enormes y de gran utilidad.

1.3.-Funcionamiento de un Cuadricóptero

Con respecto al funcionamiento de los multirrotores, podemos encontrar, dependiendo del número de palas, la clase del dron o el tipo de micro controlador instalado diferentes modos.

En este caso instalamos el Naze32 lo que nos lleva a varios tipos de utilización diferente.

La Naze32 tiene una serie de disposiciones de los motores o rotores utilizados bastante diferentes. Los motores que puede controlar van desde el 1 al 8, pero si en la configuración existen más de 6 motores será necesario instalar.

En todos los casos, la flecha de ir hacia adelante con todas las tablas de control de vuelo deberían apuntar en la misma dirección como se puede ver a continuación.

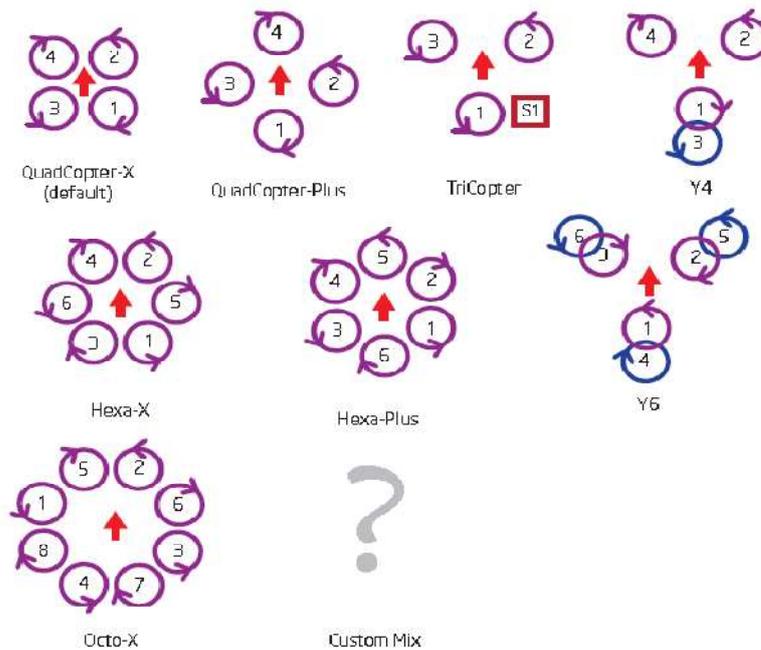


FIGURA 2 – Posiciones Naze32 (catálogo naze32)

Para las disposiciones Y4 e Y6 los motores morados son superiores mientras que lo relativo a los motores azules se encontrarían debajo. En el modo servo, (Tri- /Bi-/Estabilización de cámara), el número de motores cambia de acuerdo con el diagrama visto anteriormente. Cuando se utiliza un receptor CPPM (transmisión de todos los canales a través de una codificación serial por un solo cable) adicional cuatro salidas de motores se encontraran disponibles para Hexa. con cardán, o configuración Octo-.

Si tuviésemos un Tricóptero, el servo de cola S1 y los motores M1...M3 se conectarían como se muestra en la figura 3.

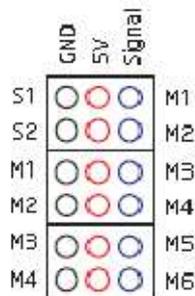


FIGURA 3 - Conexiones del motor (catálogo naze32)

Cuando está disponible una cámara para la estabilización, el cardan del Cabeceo/Giro de las conexiones servo se conectan a S1/S2, y los motores de desplazamiento también se conectan.

De la misma manera es posible programar y diseñar una interconexión para un conjunto de más de 10 motores. Pero esto ya se escapa un poco de lo que se busca.

Guiándonos en la disposición vista en la figura 12, se trabajará con el modo de vuelo de un Cuadricóptero por defecto.

Ahora, ¿cómo vuela y porque un cuadricóptero?

Principalmente existen 4 parámetros necesarios para describir los movimientos de este tipo de vehículos: la altitud, los ángulos de Roll, Pitch y Yaw. Para que el cuadricóptero actúe de una manera estable 2 motores girarán en un sentido y los otros 2 opuestos giraran en el otro.

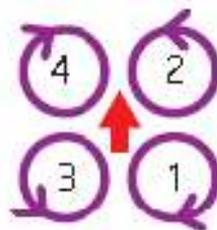


FIGURA 4 – Giro motores Dron (catálogo naze32)

En cuanto al control de la altura resulta bastante sencillo. Simplemente el hecho de aumentar o disminuir la potencia que ejercen los motores va a provocar el ascenso o descenso del dron.



FIGURA 5 – Movimiento vertical (<http://neonave.com/dron-app/>)

Si se hace incapié en el control relacionado con el ángulo de Roll y Pitch, lo que se observa es como los dos motores de una de las diagonales se mantiene invariantes mientras que los de la otra diagonal, uno ve aumentado su valor y el otro disminuido.



FIGURA 6 –Movimiento Roll/Pitch (<http://neonave.com/dron-app/>)

Por otra parte, para regular el ángulo relativo al Yaw, se fijarán los motores que giren en el mismo sentido (los de una de las diagonales), mientras que los de la otra diagonal aumentarán o disminuirán en función de si se gira a un lado o a otro.

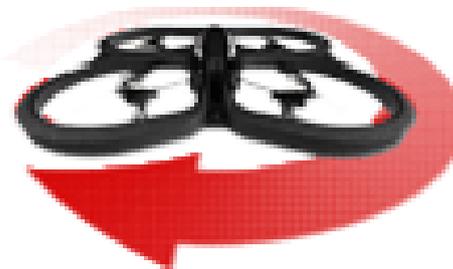


FIGURA 7 – Movimiento Yaw (<http://neonave.com/dron-app/>)

ANEXO 2.- Cálculos

2.1.- Peso

En primer lugar el cálculo más importante a realizar es el del peso del cuadricóptero. Lo principal es conocer con precisión el peso de todos y cada uno de los elementos que forman parte del dron. Por tanto lo primero será realizar una lista, para conocer los pesos de cada componente de la manera más exacta posible.

En primer lugar la Raspberry Pi (ordenador de abordo), con unas dimensiones de 85x56x17mm y un peso es de unos 45 gramos.

Luego el microcontrolador Naze32 Acro con unas dimensiones de 36x36mm (el espesor es casi despreciable) y un peso de 5,5 gramos.

A continuación, otro elemento grande son los variadores (ESC). Los elegidos de 25A disponen de un tamaño de 55x28x7mm y un peso de 28 gramos.

Conociendo las especificaciones que dadas durante la parte del hardware y la tensión y amperaje que utilizan los diferentes instrumentos, unos motores que se pueden elegir para que impulsen al cuadricóptero pueden ser: Motor Emax CF2822.

Estos motores tienen un peso de 39 gramos y cada uno es recomendado para levantar unos 700 gramos como máximo. Con unas dimensiones de 28.5Øx47,3 mm y una intensidad máxima de 15A.



FIGURA 8 – Motores Emax CF2822 (<http://www.rctecnic.com/motores-brushless-outrunner/556-motor-brushless-outrunner-emax-cf2822-1200kv>)

Por último, se requieren conocer las baterías a utilizar. Las baterías serán de tipo LiPo, ya que este tipo de baterías proporcionan gran cantidad de potencia en un periodo reducido de tiempo. Hay gran cantidad de opciones de baterías; unas aportan mayor cantidad de mAh que otras a menor o igual tensión, sin embargo, el precio también se va disparando a medida que se escoge una con mejores prestaciones. En primer lugar se escogerá una batería intermedia para ver cuál sería la capacidad de vuelo.

Batería RC Tecnic Power 2200mAh y 11.1V y 25C con un peso de 169 gramos y unas dimensiones de 22x35x104mm. Considerando esta batería se calcula el tiempo estimado de vuelo, teniendo en cuenta cuanto consumen los motores.

$$\text{Consumo de un motor al máximo: } 11,1\text{V} * 15 \text{ A} = 166,5 \text{ W}$$

$$\text{Consumo total de los motores: } 166,5 * 4 = 666 \text{ W}$$

$$\text{Tiempo estimado de vuelo: } T = \frac{E}{P} = \frac{2,2 \text{ Ah} * 11,1 \text{ V}}{666 \text{ W}} = 0,036 \text{ h} = 2,2 \text{ min}$$

Se observa un tiempo de vuelo estimado a máximo rendimiento, despreciando las pérdidas que se puedan producir por el resto de elementos, bastante bajo. Se pasará a utilizar dos baterías en paralelo. Esto proporcionará que a una misma tensión, se disponga del doble de intensidad. Por tanto, si se colocan dos baterías en paralelo iguales se consigue una intensidad total de 4400mAh a la misma tensión de 11,1 V, obteniendo así:

$$\text{Consumo de un motor al máximo: } 11,1\text{V} * 15 \text{ A} = 166,5 \text{ W}$$

$$\text{Consumo total de los motores: } 166,5 * 4 = 666 \text{ W}$$

$$\text{Tiempo estimado de vuelo: } T = \frac{E}{P} = \frac{4,4 \text{ Ah} * 11,1 \text{ V}}{666 \text{ W}} = 0,073 \text{ h} = 4,4 \text{ min}$$

Cogiendo dos baterías en paralelo se puede ver que el tiempo de vuelo se doblaría para el caso de máxima potencia. Para una potencia media, donde el cuadricóptero no se encuentre bajo una demandada máxima, si se considera el uso de unos 7-10 Amperios:

$$\text{Consumo de un motor al máximo: } 11,1\text{V} * 8 \text{ A} = 88,8 \text{ W}$$

$$\text{Consumo total de los motores: } 88,8 * 4 = 355,2 \text{ W}$$

$$\text{Tiempo estimado de vuelo: } T = \frac{E}{P} = \frac{4,4 \text{ Ah} * 11,1 \text{ V}}{355,2 \text{ W}} = 0,1375 \text{ h} = 8,25 \text{ min}$$

Se puede comprobar que, para una demanda de un 47% menor de potencia, la duración del vuelo sería de 8 minutos. Si se somete a la batería a un uso normal sin excederse, se consigue un tiempo de vuelo aproximado de unos 10 minutos, que sería lo habitual a encontrar en las tiendas.

Se comprueba también el uso de una batería de 2600mAh (5200mAh en total). En este caso, con una tensión en bornes de la batería de 11,1 V, también se obtiene al máximo rendimiento:

Consumo de un motor al máximo: **11,1V * 15 A = 166,5 W**

Consumo total de los motores: **166,5 * 4 = 666 W**

$$\text{Tiempo estimado de vuelo: } T = \frac{E}{P} = \frac{5,2 \text{ Ah} * 11,1 \text{ V}}{666 \text{ W}} = 0,086 \text{ h} = 5,2 \text{ min}$$

La diferencia existente es de un 18% mayor de duración en el vuelo, pero el coste es casi un 40% más caro, por tanto, en principio, no interesaría.

Concluyendo, dos baterías de 2200mAh de 11,1 V en bornes de la batería, obtienen un tiempo medio aproximado de vuelo de unos 10 minutos, bastante cercano a los tiempos de vuelo que se encuentran en otros cuadricópteros en el mercado. Algunos de estos poseen una duración mayor, pero también es necesario recordar que se busca un prototipo de un dron de bajo coste. Si más adelante se quisiera realizar mejoras, o proporcionar al cuadricóptero de otras propiedades extras, el precio también aumentaría.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones

Conocidos los elementos principales del dron y sus características se saca el peso aproximado de este.

<u>HARDWARE</u>	<u>CANTIDAD</u>	<u>PESO UNIDAD (g)</u>	<u>PESO TOTAL (g)</u>
Raspberry Pi	1	45	45
Naze32	1	5,5	5,5
ESC Emax 25A	4	28	112
Motor Emax cf2822	4	39	156
Bateria RC Tecnic Power 2200mAh	2	243	486
Cableado	-	-	50
Receptor RC	1	30	30
 <u>ESTRUCTURA</u>			
crucetas			72
Soporte principal	1		290
Carcasa protectora	1		195
Hélices	4	8	32
Tornillería	-	-	100
Soporte apoyo			91
TOTAL			1664,5

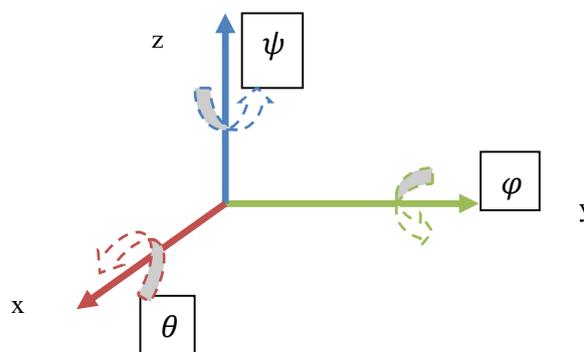
Los cálculos del peso realizado para las estructuras sólidas, tales como: el soporte principal, el soporte de apoyo, las crucetas, la tapa,... se han realizado calculando las dimensiones del diseño que posteriormente se mostraran en los planos. Con estos diseños de los diferentes elementos y las densidades de referencia de los materiales principales (Aluminio 2.7g/cm³, Fibra de Carbono 1.75g/cm³, PVC 1.4g/cm³) se calcula el peso estimado de los elementos constructivos.

2.2.- Empuje

Conocer el peso exacto del dron, llevará a otro cálculo importante. El empuje que proporciona cada motor es de 700g como máximo, por tanto, al tener 4 motores podrá levantar un peso total de 2800g. Sabiendo que el peso total del cuadricóptero es de 1665g, podemos ver que no será necesario el uso completo de los motores para levantarlo del suelo. Esto nos lleva a que, como calculamos antes, al no ser necesario el uso de la potencia máxima para levantar el dron, el tiempo de vuelo se incrementa.

2.3.- Cinemática y dinámica

A continuación, otra parte importante en los cálculos de un dron, es el cálculo correspondiente a la cinemática y dinámica del cuadricóptero. Un uso típico en aeronáutica es la llamada representación de Tait-Bryan para los ángulos y giros del Pitch, Yaw y Roll. Pero para hacerlos más intuitivos, se pueden orientar con respecto al sistema OXYZ de la siguiente manera:



Con esto la matriz de rotación que indica los movimientos del Roll, Pitch y Yaw quedaría:

$$R = R_z * R_y * R_x = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

Para el caso de ángulos pequeños $\sin\alpha=\alpha$ y $\cos\alpha=1$; por tanto quedaría

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -\psi & \varphi \\ \psi & 1 & -\theta \\ -\varphi & \theta & 1 \end{bmatrix}$$

2.4.- Aerodinámica

Otro factor importante a tener en cuenta al hacer un análisis más detallado, sería el correspondiente a la aerodinámica. Para ello se usarían las fórmulas del empuje y los momentos de arrastre producidos por las hélices.

$$\text{Fuerza de empuje: } F_{emp} = C_{emp} * \rho * D^4 * \omega^2$$

siendo,

F_{emp} : Fuerza de empuje

C_{emp} : Coeficiente de empuje

ρ : Densidad del aire

D : Diámetro de las hélices

ω : Velocidad angular de las hélices

$$\text{Momento torsor: } M_{TORSOR} = \frac{C_p * \rho * D^5 * \omega^2}{2 * \pi}$$

donde,

M_{TORSOR} : Momento torsor

C_p : Coeficiente potencia

ρ : Densidad del aire

D : Diámetro de las hélices

ω : Velocidad angular de las hélices

2.5.- Modelo dinámico

Además de la aerodinámica, otro cálculo que podría ser importante sería el modelo dinámico. Partiendo de los ángulos de giro anteriormente mencionados y de las siguientes ecuaciones:

$$J * \ddot{q} = M_T$$

$$\ddot{q} = J^{-1} M_T$$

Correspondiendo los términos anteriores a las coordenadas generalizadas y a la inversa de la matriz de inercias en función de una orientación genérica y el momento correspondiente a cada eje.

$$\ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix}$$

$$M_T = \begin{bmatrix} \tau_{\theta} \\ \tau_{\phi} \\ \tau_{\psi} \end{bmatrix}$$

Considerando a su vez un cuadricóptero simétrico con tensor de inercia:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Se obtiene que la Matriz "J" quedaría como:

$$J = R^t * I * R$$

Quedando:

$$J = \begin{pmatrix} I_{zz}\varphi^2 + I_{yy}\psi^2 + I_{xx} & I_{yy}\psi - I_{xx}\psi - I_{zz}\varphi\theta & I_{xx}\varphi - I_{zz}\varphi - I_{yy}\psi\theta \\ I_{yy}\psi - I_{xx}\psi - I_{zz}\varphi\theta & I_{zz}\theta^2 + I_{xx}\psi^2 + I_{yy} & I_{zz}\theta - I_{yy}\theta - I_{xx}\varphi\psi \\ I_{xx}\varphi - I_{zz}\varphi - I_{yy}\psi\theta & I_{zz}\theta - I_{yy}\theta - I_{xx}\varphi\psi & I_{xx}\varphi^2 + I_{yy}\theta^2 + I_{zz} \end{pmatrix}$$

Simplificando y considerando el producto de variables de señal pequeña como nulo

$$J = \begin{pmatrix} I_{xx} & (I_{yy} - I_{xx})\psi & (I_{xx} - I_{zz})\varphi \\ (I_{yy} - I_{xx})\psi & I_{yy} & (I_{zz} - I_{yy})\theta \\ (I_{xx} - I_{zz})\varphi & (I_{zz} - I_{yy})\theta & I_{zz} \end{pmatrix}$$

Finalmente la inversa quedaría:

$$J^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{I_{xx}} & \frac{(I_{zz}^2 - I_{yy}I_{zz})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\psi & \frac{(I_{yy}I_{zz} - I_{xx}I_{yy})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\varphi \\ \frac{(I_{zz}^2 - I_{yy}I_{zz})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\psi & \frac{1}{I_{yy}} & \frac{(I_{xx}I_{yy} - I_{xx}I_{zz})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\theta \\ \frac{(I_{yy}I_{zz} - I_{xx}I_{yy})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\varphi & \frac{(I_{xx}I_{yy} - I_{xx}I_{zz})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\theta & \frac{1}{I_{zz}} \end{pmatrix}$$

Si representamos el vector de tensiones en función de las fuerzas de empuje y los momentos torsores de cada una de las hélices tendríamos:

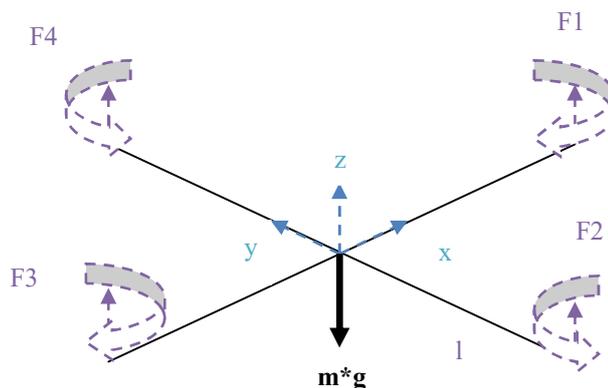


FIGURA 9 – FUERZAS Y MOMENTOS

$$M_T = \begin{pmatrix} \tau_\theta \\ \tau_\varphi \\ \tau_\psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l * (F_{\tau 2} - F_{\tau 4}) \\ l * (F_{\tau 1} - F_{\tau 3}) \\ Q_1 - Q_4 + Q_3 - Q_2 \end{pmatrix}$$

Por tanto la expresión final del modelo dinámico quedaría de la siguiente manera:

$$\ddot{q} = J^{-1}M_T$$

$$\ddot{q} = J^{-1}M_T = \begin{pmatrix} \frac{\tau_\theta}{I_{xx}} + \frac{(I_{zz}^2 - I_{yy}I_{zz})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\psi\tau_\varphi + \frac{(I_{yy}I_{zz} - I_{xx}I_{yy})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\varphi\tau_\psi \\ \frac{(I_{zz}^2 - I_{yy}I_{zz})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\psi\tau_\theta + \frac{\tau_\varphi}{I_{yy}} + \frac{(I_{xx}I_{yy} - I_{xx}I_{zz})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\theta\tau_\psi \\ \frac{(I_{yy}I_{zz} - I_{xx}I_{yy})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\varphi\tau_\theta + \frac{(I_{xx}I_{yy} - I_{xx}I_{zz})}{I_{xx}I_{yy}I_{zz}}\theta\tau_\varphi + \frac{\tau_\psi}{I_{zz}} \end{pmatrix}$$

Modelo desarrollado a partir del documento “*Modelado y estabilización de un helicóptero con cuatro rotores*” de la revista *Iberoamericana de Automática e Informática industrial* del 2007

ANEXO 3.- Estudio de Mercado

3.1.- DJI Phantom F330

Un cuadricóptero que se fabrica en serie y cuyo diámetro es de 35 cm. Incluye un soporte fijo para cámaras GoPro y un mando emisora que permite distintos modos de vuelo, desde manual hasta guiado por GPS con orientación inteligente.

Es un cuadricóptero atractivo y con un alto diseño integrado preparado para volar. Contiene una unidad de control remoto. Es estable, ágil y fácil de manejar.

Dispone también de un control de orientación inteligente (COI) y de protección contra bajos voltajes. Dispone de una velocidad máxima de vuelo de 10m/s con un tiempo de vuelo de 10 a 15 minutos. Contiene unas luces LED de alta intensidad que ayudan a su orientación durante el vuelo y se le puede acoplar una cámara GOPRO. Tiene un precio que ronda los 600€.



FIGURA 10 - DJI Phantom3 (<http://www.dji.com/es/product/phantom>)

3.2.- Airframe XM-6 Ti-QR

Posee un diseño funcional y estéticamente atractivo el Aeronavics XM - Ti-QR. Es un dron de alta estabilidad con una avanzada tecnología en la amortiguación de vibraciones. Este cuadricóptero está recomendado para profesionales que buscan una alta calidad, versatilidad y belleza. El XM-6 es ideal para el uso de cámaras de foto y vídeo. Sus 6 rotores proporcionan gran fiabilidad en caso de fallo de uno de los motores, ya que en caso de que uno dejara de funcionar, los otro cinco podrían mantener la suficiente estabilidad para aterrizar. También está disponible una versión con un 'tren de aterrizaje retráctil' - XMR. 770 mm de diámetro - adecuado para montar hasta 14 "hélices

Llegando a tener un precio de 1.321,33 €



FIGURA 11 - Airframe XM-6 Ti-QR (<http://aeronavics.com/products/shop/xm-airframe-kits/airframe-xm-6-ti-qr/>)

3.3.- MKHexaXL

Este hexacóptero dispone de 40 minutos de vuelo con una pequeña carga. Visto el resto de multicopteros es un tiempo de vuelo bastante elevado. Es capaz de cargar hasta 1,5 kg teniendo él mismo un peso de 2,2 kg incluyendo las baterías pero no las cámaras.

Este multicoptero tiene un precio de 6.515,9€



FIGURA 12 – MK-Hexa-XL6 (<https://aerorobotica.com/mikrokopter-xl6>)

Si nos centramos ahora en drones ligeramente más baratos podríamos encontrar:

3.4.- Parrot Ar Drone

El ParrotAR.Drone 2.0 Elite Edition incluye una cámara de alta definición con un servicio de grabación en vídeo, además de la posibilidad de compartir los datos de vuelo, un modo de pilotaje patentado, y un innovador sensor de presión para una mayor estabilidad a cualquier altitud. Posee además, una serie de acrobacias pre-programadas.

Dispone de un puerto USB para almacenar gran cantidad de grabaciones. Dispone de una estabilidad única que permite corregir y mantener automáticamente una posición fija en el aire, independientemente de la altitud, y lograr una elevación de hasta de 15 m.

Posee un microcontrolador ARM9 468 MHz embebido con 128 Megabytes de RAM. Comunicación Wi-Fi y USB. Un acelerómetro de 3 ejes, dos giroscopios y un altímetro ultrasónico. Posee 4 motores Brushless de 15 W y una batería recargable de 1 Ah de Litio que proporciona 11.1 voltios nominales. Con un peso de entre 380/420 gramos es capaz de volar durante 12 min con una velocidad de 5 m/s.

El Parrot Er Drone Elite tiene un precio de 250-300€



FIGURA 13 - Parrot Ar Drone (<http://ardrone2.parrot.com/>)

ANEXO 4.- Estudio de Componentes

En este apartado se van a estudiar los diferentes componentes necesarios para la construcción de un dron, así como la parte correspondiente al software interno de ellos. Se separará en dos clases principales: una primera en la cual se analizarán los componentes físicos que existen en el mercado (ordenadores de abordo, controladores de vuelo, hélices, materiales para su construcción,...); y luego una parte relacionada con los diseños internos y de software como puede ser la programación, el controlador PID,...

4.1.- Diseño y elección del hardware

Como se mencionó anteriormente, a continuación se muestran los diferentes componentes físicos que se encuentran en el mercado con sus características principales, junto una descripción y justificación de la elección que se considera más correcta para el prototipo que se busca conseguir.

4.1.1- Controladores de vuelo

Algunas de las opciones que podríamos escoger como controlador de vuelo, que incorporen al menos los giroscopios y acelerómetros:

A – PIXHAWK

Uno de los controladores más conocidos es el Pixhawk. Es un proyecto independiente de hardware libre que busca proporcionar a las escuelas, comunidad industrial y amantes de los drones, un controlador de vuelo de alta calidad al menor precio posible. Dispone de:

- 168 MHz CórteX M4F CPU (256 KB de RAM, Flash 2MB)
- Sensores: 3D ACC / Gyro / MAG / Baro

- Copia de seguridad integrado, anulación y el procesador a prueba de fallos con mezclado.
- Ranura microSD, 5 UART, CAN, 12C, SPI, ADC, etc.



FIGURA 14 – Controlador Pixhawk (<https://pixhawk.org/start>)

A pesar de ser el controlador más conocido y completo, también es caro, rondando los 100€ en función del tipo de controlador y los extras.

B - ALTIMU-10

Otro de los posibles controladores de vuelo de los que disponemos será el AltIMu-10. Es un controlador compacto que combina un barómetro digital, 3 giroscopios, 3 acelerómetros y un magnetómetro de 3 ejes para formar una unidad de medición inercial (IMU), y un altímetro.

Los sensores de los que dispone son circuitos integrados. Su precio rondaría los 30€. No es una mala elección, sin embargo encontramos otra mejor.



FIGURA 15 – ALTIMU-10 (<https://www.pololu.com/product/2469>)

C - RAZOR IMU 9DOF

También podemos encontrar controladores del tipo Razor IMU (9DOF).

Este controlador de vuelo incorpora el triple eje del giroscopio, el triple eje de acelerómetro y el triple eje de magnetómetro para darle al controlador nueve grados de medición inercial.

Esta placa viene programada con el gestor de arranque de Arduino. Las salidas de todos los sensores son procesadas por un ATmega 28 que viene incorporada en el propio controlador, permitiendo al Razor ser utilizado como poderoso mecanismo de control para vehículos aéreos no tripulados, vehículos autónomos y sistemas de estabilización de imagen.

También dispone de un menú de auto-arranque, de funciones y ayuda integrada en el ejemplo de firmware, pines de salida que coinciden con base FTDI breakout, Bluetooth, explorador Xbee (chips de comunicación inalámbrica que puede sustituir a los cables en una comunicación en serie) , una entrada de 3.5-16 VDC, un interruptor de control ON-OFF y un botón de Reset.



FIGURA 16 – RAZOR IMU 9DOF (<https://www.sparkfun.com/products/10736>)

D - NAZE32

Ahora vamos a hablar de la mejor opción encontrada para utilizar como controlador de vuelo.

Como la idea del proyecto es realizar un dron de bajo coste, la elección tomada en este caso para el microcontrolador sería la Naze32. Este es un controlador de vuelo barato que nos servirá para transmitir las órdenes del ordenador de abordo a los motores del dron.

Tendremos que tener en cuenta que existen varios tipos de microcontroladores Naze. Principalmente tendremos 2, la Naze32 y la NazeAcro. La principal diferencia que se encuentra entre estos 2 tipos de microcontroladores es que la '32' dispone de barómetro (el cual permite mantener la posición en cierta altura).

Por otro lado los Acro solo dispondrán de los giróscopos necesarios para la estabilización y de los acelerómetros. Estos también se encuentran en las Naze32 como es lógico.



FIGURA 17 – Naze32 AcroFunFly(http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_55819_AfroFlight_Naze32_Acro_FunFly_Controller.html)

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones

Se eligirá la Naze32, la cual realiza perfectamente la función deseada. La Naze32 fue diseñada para pequeñas embarcaciones a multirrotores de tamaño medio, pero con el tiempo se ha vuelto muy útil y utilizada en los proyectos de multirrotores. En lo que respecta a las características principales de la Naze32 encontramos:

- Salidas de motor flexible soportando Quad/Hexa/Tri/Bi/Y4/Y6/Octo/Cámara Cardan como mencioné con anterioridad (siendo por defecto la Quad-X).
- Hasta la entrada RC 8 ch – apoyando los receptores estándar (PWM), receptor PPM Sum (FrSky, etc), o receptores de satélite Spektrum.
- Vigilancia de la tensión de la batería.
- Moderno procesador de 32 bits funcionando a 3,3V / 72MHz.
- Dispone de un MicroUSB para la instalación y configuración.
- LEDs de señalización bastante potentes.
- Software de configuración basado en MultiWii para una instalación sencilla.

Si nos centramos ahora en las especificaciones principales del controlador tenemos que:

- Dimensiones 36x36 mm (30,5 mm de montaje).
- 5,3 gramos (sin conectores, con ellos pesa 7,3 gramos).

- 2000 grados/segundo de 3 ejes giroscopio MEMS + acelerómetro (MPU6050).
- Tensión de entrada: 16V Max en el carril de entrada y hasta 36V en la línea de detección de tensión.

4.1.2- Ordenador de abordó

A la hora de mandar al controlador las órdenes de vuelo necesarias para realizar los movimientos, disponemos de varios dispositivos diferentes que servirán como ordenador de abordó.

A - ArduinoDue

Arduino es una plataforma de hardware libre basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

El hardware consiste en una placa con un controlador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Arduino puede tomar la información del entorno en el que se encuentra a través de sus entradas analógicas y digitales, puede controlar luces, motores, así como otros actuadores que se le conecten. El microcontrolador en esta placa se programa mediante el lenguaje de programación Wiring y el entorno basado en Processing.

Cuenta con un software que se puede descargar de la página oficial y los proyectos se pueden ejecutar sin necesidad de conectar a un ordenador.

Una de las placas Arduino más utilizadas para esto es la ArduinoDue. Esta contiene todo lo necesario para apoyar a un microcontrolador, además basta con conectarlo a un ordenador con un cable micro-USB para empezar. Esta placa funciona a 3,3 V aunque existen algunas que funcionan a 5V. Tiene 54 entradas/salidas digitales siendo 12 a salida PWM. Dispone de una memoria flash de 512 KB para aplicaciones de usuario y tiene una velocidad de reloj de 84 MHz con un peso de unos 36 gramos.

También dispone de un núcleo de 32 bits, que permite operaciones en 4 bytes de datos dentro de un único reloj de la CPU y de 96 Kbytes de SRAM. Tiene un precio de unos 20€.

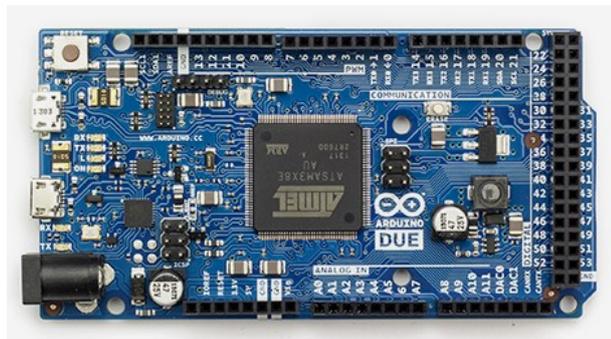


FIGURA 18 – ARDUINO (<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>)

B - HummingBoard

La HummingBoard básica dispone de una Memoria y almacenamiento de Hasta 2GB. Presenta una conectividad con una conexión RJ-45 y 2 Host USB 2.0.

También dispone de HDMI y salida exprés, SPDIF MIPI- CSI-2 cámara. Contiene un botón de restablecimiento, 26 pines GPIO Header. Necesita una alimentación de 5V.

En lo correspondiente a las dimensiones tenemos una placa de 85mm x 56mm con un software de Android o Linux.

La placa HummingBoard tiene un precio de alrededor de 100€ en función de los complementos que disponga.

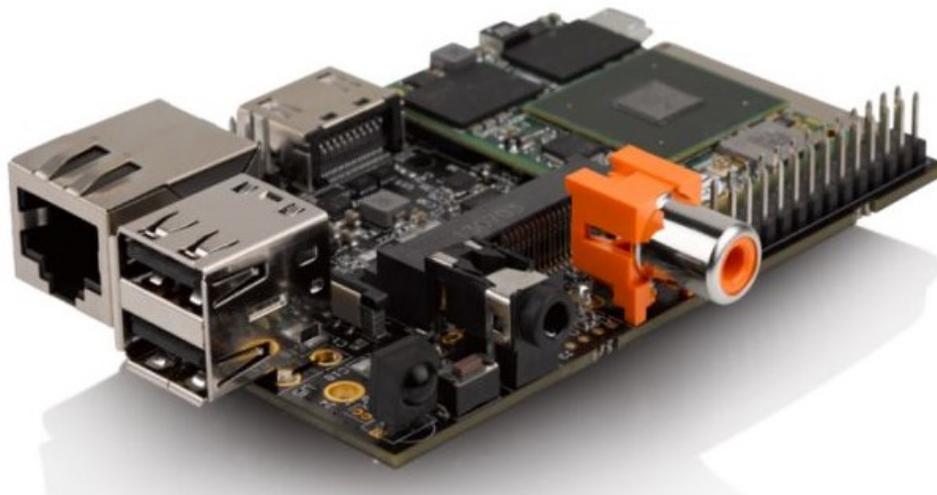


FIGURA 19 – Placa HummingBoard (<http://www.silicon.es/hummingboard-alternativa-a-la-raspberry-pi-con-procesador-modular-114768>)

C - Raspberry Pi

EL Raspberry Pi es un ordenador de placa reducida o placa única de bajo coste (una de las razones por la cual la escogemos en este caso).

El diseño de este ordenador incluye un sistema de chip Broadcom BCM2835, que contiene un procesador central a 700MHz (incluyendo a su vez un modo "Turbo" para poderle hacer overclock (o aumento de reloj) de hasta 1 GHz sin perder la garantía.

Este Raspberry Pi también dispone de un procesador gráfico VideoCore IV, y 512MB de memoria RAM (aun habiendo sido esta de 256 cuando fue lanzada).

Sin embargo el diseño del que dispone, no tiene un disco duro o unidad de estado sólido, en su lugar utiliza una ranura para tarjetas SD para un almacenamiento permanente. Esta tarjeta SD es intercambiable y se puede dotar de varios sistemas operativos a cada una de ellas pudiendo así intercambiarla según las necesidades. Tampoco incluye fuente de alimentación ni carcasa.

Este ordenador utiliza principalmente el lenguaje de programación Python así como otros del estilo de Tiny BASIC, C, Perl y Ruby.

El último modelo 3B posee wifi, bluetooth incorporado, puertos USB y una conexión de Ethernet 10/100, además de una salida HDMI para conectar una pantalla externa.

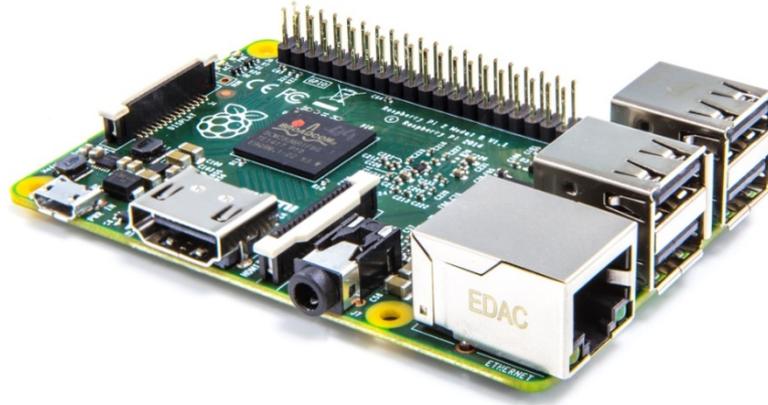


FIGURA 20 - Raspberry Pi (<https://www.raspberrypi.org/blog/raspberrypi-2-on-sale/>)

Existe la posibilidad, debido a sus puertos USB, de la conexión y el uso de teclado y ratón.

La Raspberry Pi 3B tiene un precio de mercado que ronda los 39€.

4.1.3.- Materiales

A continuación se presentan diferentes materiales que se pueden utilizar a la hora de la construcción de algunos componentes de los cuadricópteros. Cada material tiene sus ventajas o inconvenientes (resistencia, peso, coste,...), por tanto se busca encontrar la mejor opción para la fabricación del prototipo. En función del componente que se piense contruir, se podrá utilizar uno u otro componente.

- ALUMINIO:

Es un metal no ferromagnético que tiene unas propiedades mecánicas que lo hacen muy útil en la ingeniería con una baja densidad ($2,7 \text{ g/cm}^3$) y una alta resistencia mecánica. Es un material barato y tiene una gran facilidad para el mecanizado. Según la aleación que disponga el aluminio se puede llegar hasta los 690MPa.

Un punto positivo de este material también es que se puede encontrar en el mercado en una gran variedad de formas básicas: planchas, barras, varillas, etc. Es un material buen conductor de la electricidad y el calor y resistente a la corrosión, sin embargo estas propiedades no se verán explotadas. Dado que es un material ligero, resistente y barato se podrá utilizar para el soporte y apoyo del dron.

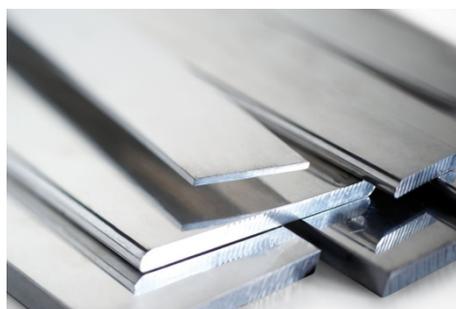


FIGURA 21 – ALUMINIO (<http://www.corteporlaser.net/corte-laser/corte-chapa-aluminio>)

- FIBRA DE CARBONO

Cosiste en una fibra formada por pequeños y finos filamentos de entre 5 y 10 micrómetros de diámetro cuya composición se basa principalmente en carbono. Cada uno de los filamentos de carbono está compuesto de miles de fibras de carbono.

En lo correspondiente a las propiedades tendría unas propiedades similares al acero siendo su resistencia longitudinal cercana a los 1100MPa mientras que la trasversal ronda los 50MPa.

La fibra de carbono tiene una densidad bastante baja ($1,6 \text{ g/cm}^3$) pero el elevado coste es un inconveniente bastante grande. Estamos ante un material con una conductividad eléctrica elevada, con un aislamiento considerable frente al calor y con una alta resistencia a variaciones de temperaturas. Dado a que la resistencia de este material a fatiga es considerable, es una buena elección para la construcción de las crucetas o brazos del dron.

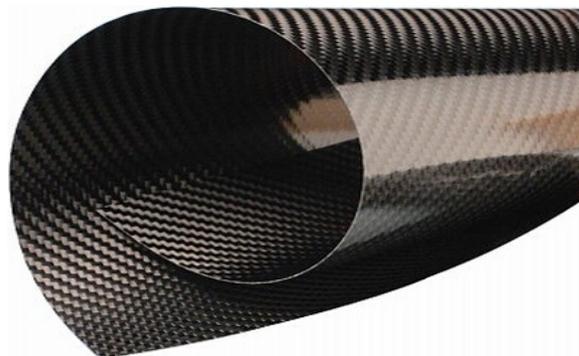


FIGURA 22 – FIBRA DE CARBONO (<http://www.plastiform.es/tag/como-laminar-fibra-de-carbono-con-resina/>)

- FIBRA DE VIDRIO

Al igual que la fibra de carbono, este material consta de numerosas y delgadas fibras, pero en este caso como su nombre indica son de vidrio. En este caso la densidad del material se ve aumentada ($2,58\text{g/cm}^3$), pero en este caso, al contrario que la fibra de carbono, el precio es muy reducido.

Además, con lo que respecta a las propiedades mecánicas, la fibra de vidrio dispone de unas propiedades similares a la fibra de carbono. Estas son de una resistencia longitudinal de 1080MPa y trasversal de 50MPa.

Podría utilizarse para las crucetas, sin embargo sería un aumento innecesario de peso, que por un módico precio, la fibra de carbono daría mejores prestaciones.



FIGURA 23 – FIBRA DE VIDRIO (<http://www.mardisur.com/mats-vidrio/508-fibra-de-vidrio-mat-450gr.html>)

- ABS(Acroilonitrilo Butadieno Estireno)

Esta clase de material es un plástico muy resistente al impacto que es utilizado especialmente en la industria de la automoción pero también de forma doméstica.

Se trata del material utilizado principalmente en las impresoras 3D. Cada uno de los tres componentes de los que está formado le otorga al material unas características distintas. El acrolonitrilo aporta rigidez, resistencia a ataques químicos, dureza y estabilidad a altas temperaturas. El butadieno proporciona tenacidad a temperaturas bajas y resistencia al impacto. Por último el estireno concede una resistencia mecánica, rigidez, brillo y dureza.

El ABS es un material con muy buenas propiedades, sin embargo el mayor inconveniente es el precio ya que aun es muy caro y no están siendo capaces de reducir el precio de manera considerable aún.



FIGURA 24 – ABS (<http://www.imprimalia3d.com/services/abs>)

- PLA (Poliácido láctico)

Se trata de un polímero constituido a partir de ácido láctico, unas moléculas con propiedades similares a las del tereftalato de polietileno (PET) que se utiliza para hacer envases principalmente siendo además biodegradable.

Siendo un termoplástico que se obtiene a partir del almidón de maíz, de yuca o mandioca o de caña de azúcar, este material es fácilmente degradable en agua y óxido de carbono

Es un material utilizado en las impresoras 3D bajo el proceso de FDM o modelado por deposición fundida. Al igual que el caso anterior, al ser utilizado por impresoras 3D tiene un precio demasiado elevado.



FIGURA 25 – PET (<http://www.iniciativas3d.com/Iniciativas3D/pet-175-mm>)

- POLIESTIRENO

Otro de los materiales que se pueden utilizar en la construcción de nuestro dron es el poliestireno, específicamente el poliestirenoextrusionado. Este es el resultado de la extrusión del poliestireno en presencia de un gas espumante que nos da una espuma rígida.

Su principal propiedad es que posee una densidad enormemente baja ($0,033g/cm^3$), sin embargo posee una muy baja resistencia también (250 kPa).

Es un gran aislante térmico, el cual corresponde a su principal uso pero también, si se le pone un grosor considerable, es un buen protector para choques otorgando muy poco peso. Es un material ideal para usar como tapa ya que es ligero y barato.



FIGURA 26 – POLIESTIRENO (<http://aislamientosjavier.com/el-poliestireno-extruido/>)

4.1.4.-Hélices

En lo que respecta a las hélices de un cuadricóptero, en el mercado existe una gran variedad en cuanto a tamaño y compuestos. Los más comunes y conocidos son las compuestas de plástico (nylon o ABS) aunque se pueden encontrar algunas de fibra de carbono. La principal diferencia que existe entre una y otra es básicamente el precio.

El problema más común referente a los drones y sus hélices es que estas suelen ser las que más se rompen y hay que cambiar a menudo. Esto lleva a elegir, para comenzar con el diseño de drones, hélices más baratas como pueden ser las de plástico aunque sean menos resistentes que las de fibra de carbono.

Existen a su vez diferentes fabricantes y por tanto diferencias entre las hélices fabricadas por unos y por otros. Incluso se pueden encontrar diferencias significativas entre las hélices de un mismo fabricante, luego para conseguir una hélice adecuada, sería recomendable el uso de varias diferentes, para ver cual se adapta mejor al menor coste posible.

Las hélices se describen de una manera determinada que indica las características que tiene.

Por ejemplo, si tenemos que la hélice tiene 5x3 o 50/30 significaría:

El primer dígito hace referencia a la longitud de la hélice en pulgadas (5') mientras que el segundo es el pitch o paso de la hélice (3'). El paso de hélice corresponde con la distancia que recorre una hélice en una vuelta completa.

Esto lleva a que, a una misma longitud, una hélice con más pitch provocará un incremento en la velocidad del dron. Lo mismo ocurriría para una hélice con mayor longitud e igual pitch. Ambos casos provocan que el motor instalado consuma mayor número de amperios.

La teoría dice que a más kV de motor, más pequeña tiene que ser la hélice y menos eficiente es todo el sistema. Con motores de menos kV se podrán poner hélices más grandes y es más eficiente, pero la configuración ideal es difícil de decir y depende de otros muchos factores, como por ejemplo el chasis diseñado.

Conociendo todos estos factores se llega a la conclusión de que la opción más barata y utilizada para comenzar serían las hélices con dimensiones 8x3,8”.

El precio que rondan este tipo de hélices es muy bajo, desde apenas 1,5€ para hélices de plástico hasta 4€ para las de carbono (por hélice). También existen otras más caras dependiendo del fabricante y la composición, pero como se busca minimizar los costes, habrá que centrarse en las más baratas.



FIGURA 27 – Hélices (<http://www.banggood.com/HQProp-Direct-Drive-5030-5X3-Glass-Fiber-Mix-2-PCS-CW-CCW-For-Mini-Multirotor-p-998573.html>)

4.1.5.-Motores

Otra parte muy importante de un cuadricóptero es el motor utilizado. Para elegir una buena combinación variador / motor / hélice / batería primero será necesario conocer el peso del dron. En caso de quedarnos cortos con la fuerza de los motores, estos se encontrarán en un estado de sobreesfuerzo y por tanto no se conseguiría un vuelo adecuado.

En caso de utilizar motores demasiado potentes, el dron dispondrá de un exceso de potencia que se traducirá en un control más complicado de lo normal, siendo el cuadricóptero más ágil y rápido en sus maniobras.

En caso de duda se prefiere sobredimensionar el peso del dron para que sea más ágil y tenga una respuesta veloz en lugar de lenta frente a las variaciones.

Anteriormente ya se calculó el peso del dron con sus correspondientes motores, baterías y tiempo de vuelo. Los motores seleccionados fueron los Motor Emax CF2822, que junto con la Bateria RC Tecnic Power 2200mAh, proporcionaba un tiempo de vuelo aproximado a media carga de 10 minutos.

4.1.6.- ESC

Como ya se indicó con anterioridad, el ESC es un circuito encargado de generar una señal trifásica para alimentar al motor de las hélices. Regula, además, la velocidad de giro de las hélices a partir de la señal suministrada por el PWM.

Un ESC adecuado para el prototipo es el ESC EMAX de 25A. Esto permite sobredimensionar el amperaje requerido por los motores. Además, con este ESC se ajusta el rango de PWM de un mínimo de 1 milisegundo a un máximo de 2 milisegundos, teniendo por defecto un 0% de empuje a 1.2 milisegundos y un 100% de empuje a 2 milisegundos.

Algunas de las características que también incluye este ESC y las protecciones que incorpora son:

- Protección de baja tensión: otorga protección en el caso de desconectar el motor o disminuir la potencia cuando la tensión de entrada cae. Con ello el motor dejaría de dar par.
- Pérdida de la protección de señal: en el caso de que se produzca una pérdida de señal durante más de 1 segundo, la potencia suministrada sufrirá una disminución a menos del 25% hasta que vuelva a ser detectada.
- Protección de sobrecalentamiento: si se produce un aumento de temperatura que sobrepase los 100°C, la potencia otorgada también se verá reducida por debajo del 30%
- Hardware auto-comprobación: contiene un sistema para comprobar por sí mismo la conexión de la batería



Figura 28 – ESC EMAX de 25A

(https://www.readymaderc.com/store/index.php?main_page=product_info&products_id=4218)

4.1.7- Emisoras

Una parte también muy importante que se puede encontrar en los cuadricópteros es el empleo de las emisoras de control. Estas existen muy variadas y con frecuencias diferentes. Entre las más utilizadas se pueden encontrar la FRSKY Taranis o la Futaba. Hay también otros muchos tipos y marcas de emisoras, sin embargo, en caso de no querer realizar una inversión muy grande, se puede conseguir un simulador de emisora para el ordenador.



FIGURA 29 – Emisora TARANIS (<http://www.avionrc.es/emisora-taranis-frsky-24ghz-accst-x9d-plus-con-receptor-8-canales-10815-p.asp>)



FIGURA 30 – Emisora Futaba (<http://www.heli-system.com/futaba/271-emisora-futaba-t7c-24ghz.html>)

4.2.- Diseño y elección del software

A continuación se describirá lo relacionado con la parte interna de los componentes electrónicos y su correcta configuración. También se regularán los valores necesarios para el funcionamiento del cuadricóptero y el modo de conexión entre los diferentes elementos.

4.2.1.- Entorno de Programación

Al tener la Raspberry PI como ordenador de abordo, es interesante disponer de una IDE (Entorno de desarrollo integrado) en la cual programar el código necesario para nuestro dron. Una buena elección de IDE es el Geany, un entorno disponible en muchas plataformas, incluida Linux (plataforma principal de la Raspberry PI).

Por otra parte, Arduino IDE ya ha lanzado una versión para Raspberry Pi y su plataforma Linux. Sin embargo, no se garantiza un 100% de fiabilidad y de estabilidad a la hora de su empleo, a pesar de si existir esta garantía para los usuarios de Arduino.

En un principio se hará uso de la Arduino IDE, utilizando como lenguaje de programación C++, ya que de querer cambiar el microprocesador de una Raspberry Pi a un Arduino nos serviría. Sin embargo, debido a que la IDE Geany también soporta la programación en C++, se podría transcribir el programa de un entorno a otro sin problema.

4.2.2.-Motores

Un módulo importante que tenemos es el de los motores. Este conecta la Naze32 con los ESC a través de los PWM. Es necesario conocer el protocolo utilizado por los ESC para un correcto uso de los motores. Los protocolos destacados serán:

- Inicio Normal: primero conectamos los ESC a la alimentación (en este caso las baterías). Cuando estos detectan el valor mínimo de los PWM, emitirá una señal sonora larga. A continuación el sistema detecta las baterías señalizando el número de células con repetidos pitidos cortos. Por último se realiza una auto-comprobación.

- Calibrado: Al contrario que en el inicio básico, en este caso se detecta el PWM máximo, indicándolo en esta situación con un par de pitidos. Una vez más, durante el calibrado del rango, detectará el valor mínimo del PWM con su respectivo aviso sonoro. También durante la regulación detectará las células de batería y procederá a la auto-comprobación. Como se puede observar, tanto en un inicio normal del los ESC como durante la regulación, se realizaran las comprobaciones básicas. Como cabe esperar, en caso de que todas estas comprobaciones no se sucedan de manera adecuada, el sistema realizará 20 avisos sonoros.

Además de los avisos en la conexión y calibrado de los motores, el modulo encargado de los motores dispone de 3 funciones principales:

- Regular los motores para aprovechar al máximo su poder de empuje.
- Calibrar y ajustar los rangos de los PWM definido en el firmware de los ESC.
- Armar los motores para la posterior utilización introduciendo el PWM mínimo.

4.2.3.- Controlador

Para poder controlar el Dron es necesario conocer el movimiento de cada uno de sus 4 grados de libertad. El conocer estos movimientos nos permitirán regular los motores de una manera más eficaz.

Los 4 grados de libertad de los que dispone el quadricóptero son:

- Pitch : controla el movimiento lineal en el cual el dron va hacia adelante y hacia atrás.
- Yaw: indica la rotación sobre el eje vertical.
- Roll: regula el movimiento lateral.
- Throttle: se refiere al movimiento vertical otorgado a través de un aumento o disminución de potencia de los motores.

Lo que se obtiene en la tabla posterior es la relación entre las entradas (filas) y salidas (columnas). Para conocer mejor estos movimientos, los representamos en una matriz de comandos:

	ADELANTE	ATRAS	DERECHA	IZQUIERDA
PITCH	FRENAR	ACCELERAR	CONSTANTE	CONSTANTE
YAW	FRENAR	FRENAR	ACCELERAR	ACCELERAR
ROLL	CONSTANTE	CONSTANTE	FRENAR	ACCELERAR
THROTTLE	ACCELERAR	ACCELERAR	ACCELERAR	ACCELERAR

Figura 31 - Tabla de movimientos del Quadcopter

ACCELERAR-> requiere que el motor acelere en respuesta a una entrada positiva

FRENAR-> requiere que el motor frene en respuesta a una entrada positiva

CONSTANTE-> requiere que se mantenga igual el motor

A continuación se realiza, conociendo estos grados de libertad, un controlador real. Esto es debido a que en el caso de ser una situación ideal, el movimiento del dron, así como el funcionamiento de los motores y los giroscopios, sería perfecto. Sin embargo, debido a que en el mundo real no existe una adaptación perfecta, es necesaria la implementación de un regulador para un óptimo funcionamiento. En este caso se diseña un regulador sencillo PID (Proporcional-Integrador-Derivativo).

La implementación de un PID es debido a que unas condiciones de vuelo perfectas nunca se van a dar. Tanto externamente como internamente, existen pequeñas perturbaciones que provocarían una inestabilidad en el funcionamiento entre las que se pueden encontrar:

- La propia auto-nivelación del dron. Con esto nos referimos a que el quadricóptero debe volver a su posición inicial de una manera sencilla y cómoda cuando se haga nulo el número del Pitch.
- Las perturbaciones debidas a factores externos (incluidos meteorológicos). La lluvia y el viento son 2 de los factores más relevantes en este caso. Esto es debido a que en el caso no ideal, existen rachas de viento que desestabilicen al dron provocando un comportamiento variable e impredecible.

Debido a estos problemas que se pueden originar de manera aleatoria, hay que diseñar el regulador PID. Este regulador será capaz de realizar el control que no podríamos corregir con el mando del quadricóptero, ya que a pesar de reaccionar a una velocidad desorbitante, no se es capaz de regular de una manera adecuada el sistema.

A la hora de controlar las variables hay que centrarse en la regulación del Pitch, Roll y Yaw (tres de los movimientos más importantes).

El Throttle no será necesario de momento porque es más sencilla de regular la potencia que generan los motores.

Como se menciona con anterioridad, los PID se componen de tres partes diferenciadas que trabajan en conjunto para obtener una regulación lo más eficaz posible.

- La parte Proporcional (P) ayudará a optimizar el error angular producido.
- En lo que respecta a la parte Integral (I), proporcionará una corrección en las desviaciones producidas por el viento y/o la lluvia.
- Por último, la parte Derivativa (D) se encarga de corregir el error producido por el propio sistema para disminuirlo en mayor medida posible.

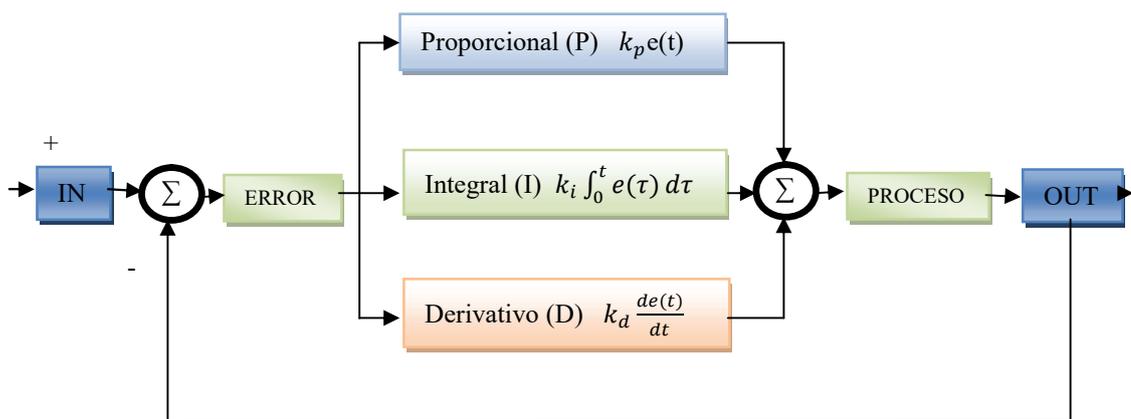


Figura 32 – DISEÑO PID BASICO

En lo correspondiente a las constantes de nuestro controlador, no se puede conocer el valor exacto de k_p o k_d , sin embargo se pueden calcular de una manera experimental teniendo en cuenta que la “ k_p ” (constante proporcional) provocará un movimiento más rápido hacia la estabilidad, sin embargo, también puede generar sobreimpulsos indeseados. Por otra parte la “ k_d ” (o constante derivativa) tendrá el deber de amortiguar oscilaciones y reducir la velocidad de giro.

A continuación regularemos los valores del PID utilizando los sensores de la Naze32.

4.2.4.- Calibración controlador

La calibración interna del controlador de vuelo se realizará a través de la aplicación de Chrome llamada “Baseflight”. Baseflight es el firmware que irá instalado en la Naze32, por tanto para la configuración interna de éste, se hará uso de la aplicación mencionada “Baseflight configuration”.

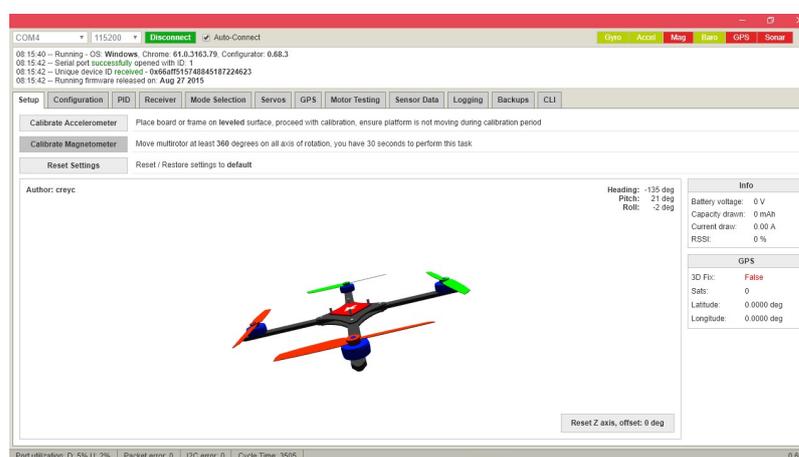


Figura 33 - Baseflight – Configurator

En primer lugar el valor más importante a regular es el proporcional. Este es el que se encarga de proporcionar la estabilidad a nuestro cuadricóptero. Si “P” es grande el multirotor sufrirá grandes oscilaciones, mientras que si es bajo, será imposible controlar el multirotor.

Una vez se dispone de un valor aproximado de “P” se le pondrá el valor de “0” a la “I” y la “D”. Simplemente con esto el dron podría flotar sin problemas. La “I” muestra como se repite la acción proporcional, luego dejándola a cero, los movimientos serían bruscos. Por tanto se irá aumentando el valor de esta hasta conseguir que mantenga la posición de manera precisa. Si aumenta en exceso el multirotor oscilará lentamente teniendo movimientos más lentos.

Por último al regular la “D” se consiguen movimientos mas suaves que corrigen el error de posición. Si se aumenta en exceso el valor de “D” se obtienen reacciones descontroladas.

El ajuste del PID es necesario y recomendable realizarlo durante pruebas de vuelo del dron completo. Unos valores de la parte Proporcional para comenzar los ajustes serían los observados en la Figura 34.

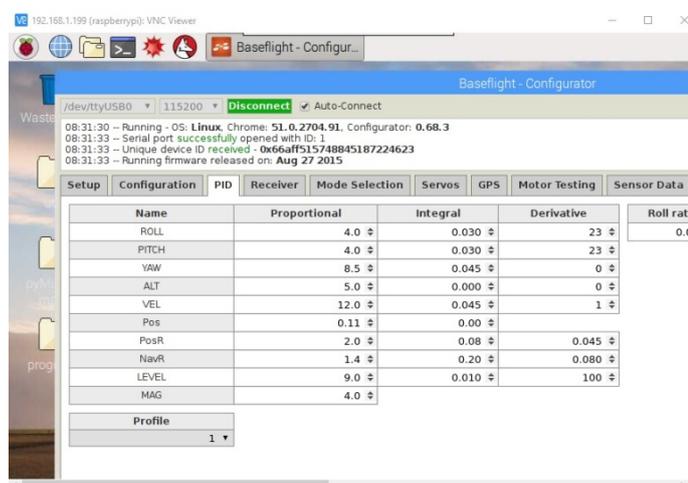


Figura 34 – Calibracion PID Baseflight

Las capturas de pantalla que se observan se encuentran realizadas desde el portátil a través del escritorio remoto proporcionado por VNC, que permite ver las operaciones realizadas en la Raspberry Pi sin necesidad de una pantalla adicional.

4.2.5.- Conexión Raspberry – Naze32

En primer lugar es necesario conectar el ordenador de abordo Raspberry Pi, con el controlador de vuelo Naze32. Para ello se hará uso de un cable USB – MicroUSB. Por otro lado, para que ambos dispositivos se entiendan entre si, a la hora de programar será necesario indicar de manera adecuada la entrada de información. Para ello se hace uso del comando: `board = AfroNaze32("/dev/ttyUSB0");` este garantiza que la conexión de los puertos USB y MicroUSB sea la adecuada y pueda recibir los datos a través de él correctamente. Si se conectara a otro dispositivo diferente (portátil, otro tipo de ordenador,...) el puerto al que haría referencia el comando cambiaría.

Para comprobar el estado y que exista la conexión se dispone de un pequeño programa:

```
__autor__ = "Juan Nistal"
__email__ = "j.nistal@hotmail.com"
__estado__ = "Estudiante"

from Naze32 import AfroNaze32
import time

if __name__ == "__main__":

    board = AfroNaze32("/dev/ttyUSB0")

    try:
        board.arm()
        print "El controlador está listo"
        print "5 segundos para desarmarse"
        time.sleep(5)
        board.disarm()
        print "Desarmado"
        time.sleep(5)

    except Exception,error:
        print "ERROR"+str(error)
```

El programa anterior simplemente comprueba que existe conexión entre el ordenador de abordo y el controlador de vuelo, dando error en caso contrario. En la figura 35 se muestra el programa anterior en ejecución.

```
Python 2.7.9 Shell
File Edit Shell Debug Options Windows Help
Python 2.7.9 (default, Sep 17 2016, 20:26:04)
[GCC 4.9.2] on linux2
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> ===== RESTART =====
=
>>>
El controlador está listo
5 segundos para desarmarse
Desarmado
>>>
```

Figura 35 – Simulación Comprobación Puerto

4.2.6.- Otras Conexiones y Regulaciones

La conexión de los ESC/Variadores se producirá de acuerdo a los planos de la placa (Figura 36). Como utilizamos PWM, habrá que conectar al menos 6 pines (negativo, positivo, canal 1, canal 2, canal 3, canal 4)

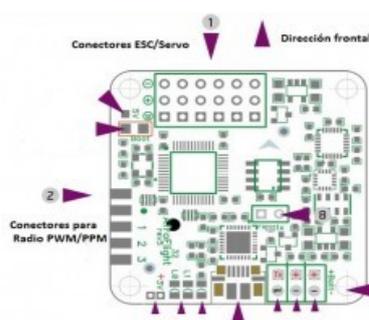


Figura 36 – Naze32 - Configuración

Para un movimiento seguro, tendremos que asegurarnos que los motores instalados no transmiten una vibración exagerada o excesiva al controlador ya que, en caso contrario, nunca se podría llegar a ajustar el vuelo de una manera estable y suave. Esto provocará la calibración del acelerómetro de una manera muy simple, básicamente presionando el botón de “Calibrate Accelerometer”.

Será importante asegurarse que el centro de gravedad del dron se encuentra lo mejor centrado posible. Para conseguirlo una buena idea es jugar con la simetría y posicionamiento de la batería (elemento más pesado por regla general).

Después de conseguir un centrado de masa, con las hélices quitadas, se ejecutan los test, ajustando así las vibraciones de los motores. Esto se regulará de tal manera, hasta que consigamos que el cuadricóptero tenga el menor nivel de vibraciones posible, como se mencionó antes (al menos el producido por los motores).

En la misma pestaña donde se calibra el acelerómetro (Figura37) se pueden restaurar de nuevo, en caso de error o de necesidad, los valores de fábrica que se encuentran por defecto en la placa.



Figura 37 – Calibración Acelerómetro

Teniendo estas vibraciones en el nivel más bajo posible, se pasará al ajuste con las hélices. Como se mencionó anteriormente en la calibración del PID, esta parte sería necesaria realizarla con el dron construido y partiendo de los valores por defecto, ajustándolos a medida que se prueba el vuelo del cuadricóptero.

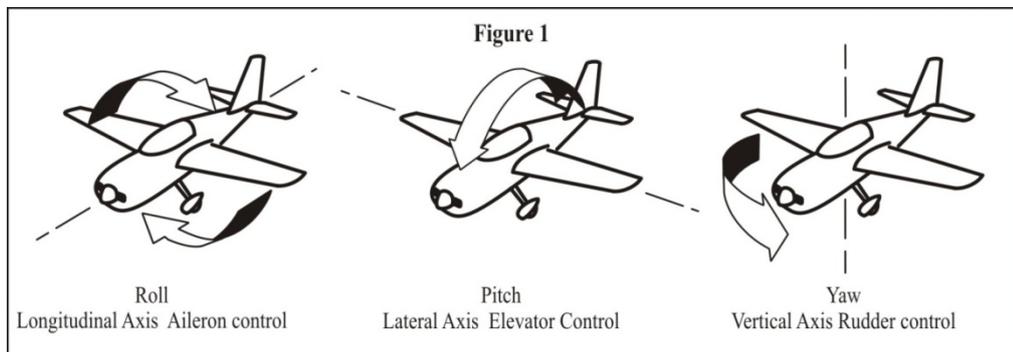


Figura 38 – Roll, Pitch y yaw (<http://allrcflight.com/airplane-turning-tendencies/>)

A pesar de ser la imagen superior la representación de los movimientos en un avión, los giros funcionarán de una manera idéntica.

Al moverlo en las direcciones indicadas, se nota como en función del eje en el que se realice el movimiento, aparecerá una fuerza que intentará contrarrestar esos movimientos de rotación. Lo que habrá que hacer en este caso es ir regulando poco a poco los valores que hay en la aplicación e ir consiguiendo así una sensibilidad mayor en el PID.

Además de poder calibrar los giroscopios, se puede ajustar el tipo de aceleración que se quiere otorgar al dron, consiguiendo así que tenga un valor mínimo y máximo de esta. Por otra parte se le puede dar un límite inferior al voltaje de la batería. Con este, cuando el valor disminuya por debajo de los valores marcados, aparecerá una señal sonora que indicará el agotamiento de la batería.

4.2.7.- Otros Programas y Simulaciones

En este apartado se muestran otros programas realizados en el ordenador de abordo (Raspberry Pi), que junto con el mostrado anteriormente, que une a través del puerto USB la Raspberry con la Naze32, ayudan a obtener valores significativos e importantes para el correcto funcionamiento y movimiento del dron.

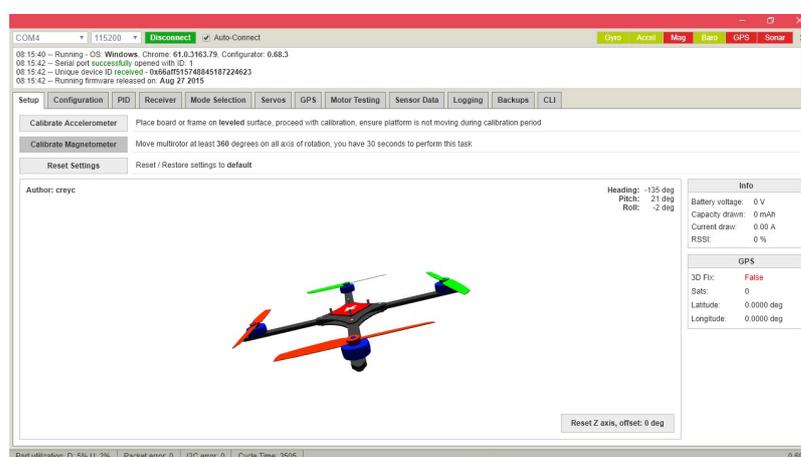


Figura 39 – Simulación Baseflight

El primero de los programas realizados después de comprobar la conectividad del ordenador de abordo y el controlador de vuelo es el necesario para adquirir los **valores de posición del cuadricóptero**. Estos valores principales obtenidos serán los correspondientes a ángulos girados y altitud.

El programa desarrollado para la obtención de estos valores es el mostrado a continuación. Con éste conseguimos obtener del controlador de vuelo los ángulos de giro y la altura a tiempo real y actualizando el valor obtenido de una manera suficientemente rápida para conocer constantemente la posición exacta del cuadricóptero.

```
__autor__ = "Juan Nistal"  
__email__ = "j.nistal@hotmail.com"  
__estado__ = "Estudiante"
```

****En primer lugar hay que traer del código completo los valores a tomar, en este caso los ángulos y altitud:**

```
from Naze32 import AfroNaze32  
from sys import stdout
```

```
if __name__ == "__main__":
```

**** Como hicimos en el caso de la conexión simple entre ordenador y controlador, es necesario indicar el puerto a través del cual se recibirán los datos del controlador:**

```
    board = AfroNaze32("/dev/ttyUSB0")
```

**** Se recogen los datos del controlador a tiempo real de ángulo (ATTITUDE) y altitud(ALTITUDE):**

```
    try:  
        while True:  
            board.getData(AfroNaze32.ATTITUDE)  
            board.getData(AfroNaze32.ALTITUDE)
```

****Finalmente se escriben los valores una vez se van obteniendo para irlos actualizando:**

```
        # Escritura  
        message = "rotacion_x = {:.2f} \t rotacion_y =  
{:.2f} \t rotacion_z = {:.2f} \t altitud = {:.2f} \t"  
        ".format(float(board.attitude['rotacion_x']),float(board.attit  
ude['rotacion_y']),float(board.attitude['rotacion_z']),float(b  
oard.altitude['altura']))  
        stdout.write("\r%s" % message )  
        stdout.flush()  
        # Fin de mensaje
```

****Para concluir siempre añadiremos una línea en caso de error:**

```
    except Exception,error:  
        print "Error en: "+str(error)
```

Para ver cómo trabaja el código anteriormente descrito, se dispone de una captura de pantalla a través del escritorio remoto VCN que muestra los valores recogidos en la figura 40.

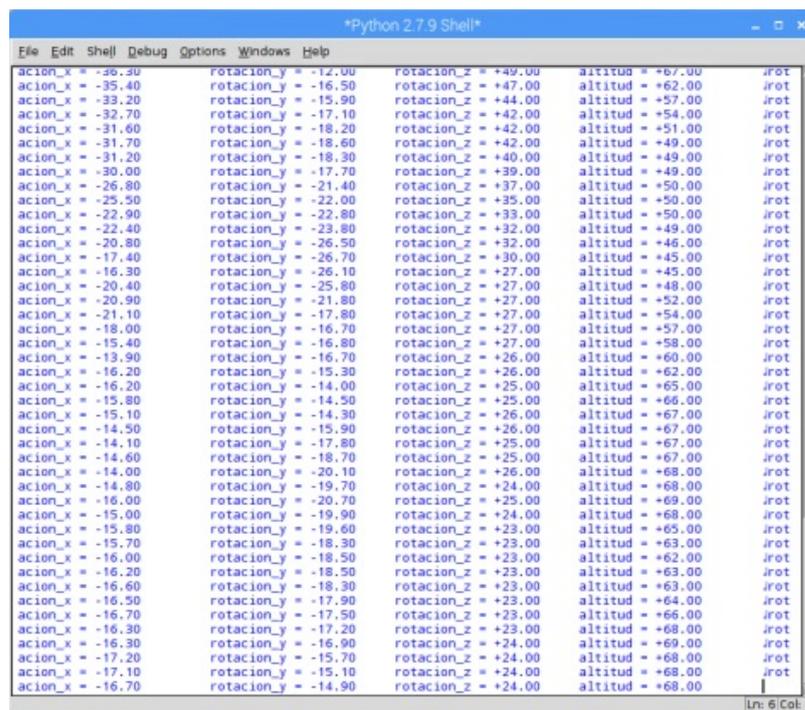


FIGURA 40 – Resultado simulación programa Posición.

Para poder observar el resultado obtenido de una forma más intuitiva se genera un programa que **represente gráficamente** los valores recogidos de los **ángulos y altitud**. Al igual que en el caso anterior indicaremos el puerto a través del que se obtienen y la recogida de datos añ

```
class Chart(object):
    adiando las líneas de comandos de dibujo:
    def __init__(self):
        self.senses = 0
        self.sb, self.axbuf, self.aybuf, self.azbuf = 0, 0,
0, 0

        plt.show(block=False)
        plt.ion()
        self.fig = plt.figure(1, figsize=(19, 6))
        plt.ylim([-1000, 1000])
        plt.xlim([0, 300])

    def plot(self, ax, ay):
        self.senses += 1
        plt.plot([self.sb, self.senses], [self.axbuf,
rotacion_x], color='r', label='AX')
        plt.plot([self.sb, self.senses], [self.aybuf,
rotacion_y], color='g', label='AY')
        plt.plot([self.sb, self.senses], [self.azbuf,
rotacion_z], color='b', label='AZ')
        self.fig.canvas.draw()
        self.sb, self.axbuf, self.aybuf, self.azbuf, = self.senses, ax,
ay, az,
```

La representación gráfica obtenida en tiempo real de los valores anteriores vendrá mostrada en la figura 41.



Figura 41 – Representación Giros y Altura

Una vez se obtiene la posición del cuadricóptero será necesario conocer el valor y magnitud de su movimiento. Se genera así un programa que recoge los **valores inerciales del controlador de vuelo**, velocidades en los giros, aceleraciones,...

```
__autor__ = "Juan Nistal"  
__email__ = "j.nistal@hotmail.com"  
__estado__ = "Estudiante"
```

****Al igual que antes se hace referencia a los valores inicializados donde se recogen los datos:**

```
from Naze32 import AfroNaze32  
from sys import stdout
```

****Se indica el puerto a través del cual se consigue la comunicación.**

```
if __name__ == "__main__":  
    board = AfroNaze32("/dev/ttyUSB0")
```

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones

```
# Recogida de datos inerciales de la placa de los  
acelerómetros
```

```
**Obtención de los datos inerciales
```

```
try:  
    while True:  
        board.getData(AfroNaze32.RAW_IMU)
```

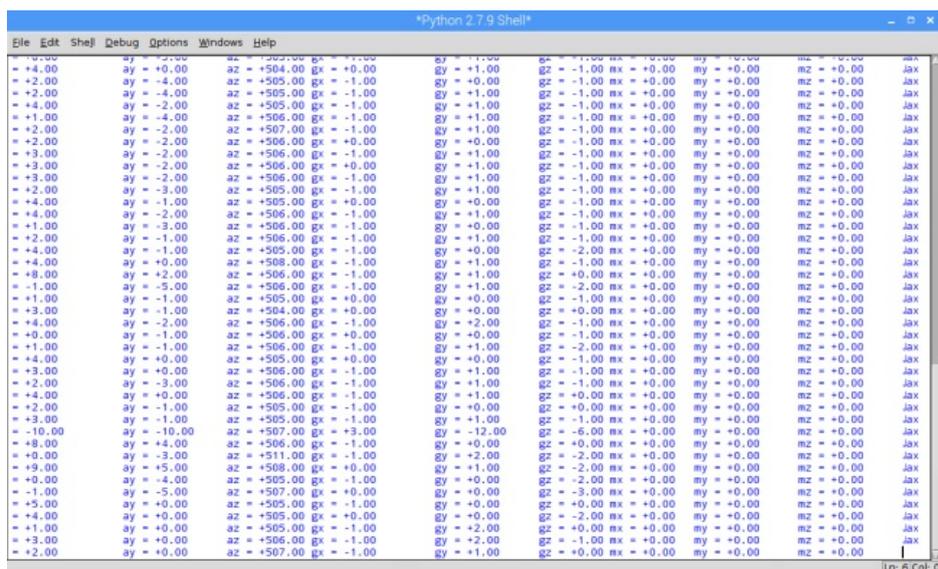
```
**Escritura de dichos valores a tiempo real y de una manera continuada y  
actualizada.
```

```
        message = "ax = {:.2f} \t ay = {:.2f} \t az =  
{:.2f} gx = {:.2f} \t gy = {:.2f} \t gz = {:.2f} mx =  
{:.2f} \t my = {:.2f} \t mz = {:.2f} \t "  
        .format(float(board.rawIMU['ang_x']), float(board.rawIMU['ang_y'  
']), float(board.rawIMU['ang_z']), float(board.rawIMU['vel_x']),  
float(board.rawIMU['vel_y']), float(board.rawIMU['vel_z']), floa  
t(board.rawIMU['acel_x']), float(board.rawIMU['acel_y']), float(  
board.rawIMU['acel_z']))  
        stdout.write("\r%s" % message )  
        stdout.flush()
```

```
** Mensaje de error en caso de fallo
```

```
except Exception,error:  
    print "Error en: "+str(error)
```

Obtenemos con esto, usando de nuevo el escritorio remoto:



```
*Python 2.7.9 Shell*  
File Edit Shell Debug Options Windows Help  
-10.00 ay +2.00 az =+502.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+4.00 ay +0.00 az =+504.00 gx =+0.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+2.00 ay -4.00 az =+505.00 gx =-1.00 gy =+0.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+2.00 ay -4.00 az =+505.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+4.00 ay +2.00 az =+505.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+1.00 ay -4.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+2.00 ay -2.00 az =+507.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+2.00 ay -2.00 az =+506.00 gx =+0.00 gy =+0.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+3.00 ay +2.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+3.00 ay -2.00 az =+506.00 gx =+0.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+2.00 ay -3.00 az =+505.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+4.00 ay +1.00 az =+505.00 gx =+0.00 gy =+0.00 gz =-2.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+4.00 ay -2.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+1.00 ay -3.00 az =+506.00 gx =+1.00 gy =+0.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+2.00 ay -1.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+4.00 ay +1.00 az =+505.00 gx =-1.00 gy =+0.00 gz =-2.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+4.00 ay +0.00 az =+508.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+8.00 ay +2.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =+0.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
-1.00 ay -5.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-2.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+1.00 ay -1.00 az =+505.00 gx =+0.00 gy =+0.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+3.00 ay -1.00 az =+504.00 gx =+0.00 gy =+0.00 gz =+0.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+4.00 ay -2.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+2.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+0.00 ay -1.00 az =+506.00 gx =+0.00 gy =+0.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+1.00 ay +1.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-2.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+4.00 ay +0.00 az =+505.00 gx =+0.00 gy =+0.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+3.00 ay +0.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+2.00 ay -3.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+4.00 ay +0.00 az =+505.00 gx =+0.00 gy =+0.00 gz =+0.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+3.00 ay -1.00 az =+505.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
-10.00 ay -10.00 az =+507.00 gx =+3.00 gy =-12.00 gz =-6.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+8.00 ay +4.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+0.00 gz =+0.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+0.00 ay -3.00 az =+511.00 gx =-1.00 gy =+2.00 gz =-2.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+9.00 ay +5.00 az =+508.00 gx =+0.00 gy =+1.00 gz =-2.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+0.00 ay -4.00 az =+505.00 gx =-1.00 gy =+0.00 gz =-2.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
-1.00 ay -5.00 az =+507.00 gx =+0.00 gy =+0.00 gz =-3.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+5.00 ay +0.00 az =+505.00 gx =-1.00 gy =+0.00 gz =+0.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+4.00 ay +0.00 az =+505.00 gx =+0.00 gy =+0.00 gz =-2.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+1.00 ay +0.00 az =+505.00 gx =-1.00 gy =+2.00 gz =+0.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+3.00 ay +0.00 az =+506.00 gx =-1.00 gy =+2.00 gz =-1.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax  
+2.00 ay +0.00 az =+507.00 gx =-1.00 gy =+1.00 gz =+0.00 mx =+0.00 my =+0.00 mz =+0.00 Jax
```

Figura 42 – Simulación Inercias

Al igual que en la posición, se dispone de una serie de comandos en un programa aparte que representa en la figura 43 esos movimientos inerciales de manera gráfica.

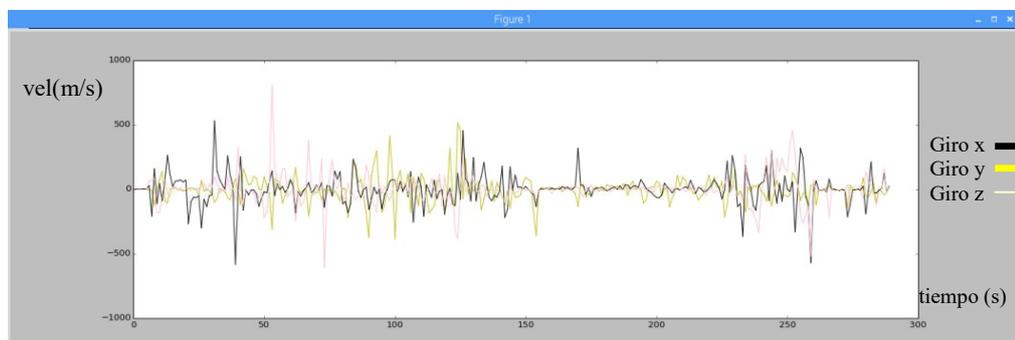


Figura 43 – Representación Gráfica de Inercias

Con el uso de la aplicación Baseflight se pueden obtener también las gráficas directamente del controlador de vuelo como comprobación para ver, que cuando se extraen los datos de este controlador directamente con el programa redactado en el ordenador de abordo, se obtienen los mismos resultados y a tiempo real también.

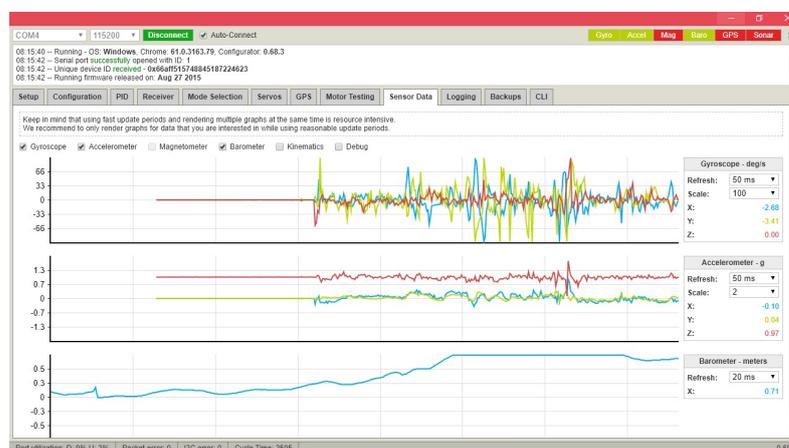


Figura 44 – Simulación Posición Baseflight 2

También se dispondrá de otra pestaña en la cual se analiza el ajuste de los motores en función de la inclinación para volver al estado original de partida. Esto sirve para provocar la estabilidad del dron y observar como de rápida sería la vuelta a una posición estable.



Figura 45 – Simulación estabilización Motores

Los programas anteriormente descritos, son los principales necesarios para obtener posición, velocidad de movimiento, aceleraciones, altura, ángulos de desplazamiento de manera periódica y constante. En el caso de querer transmitir estos datos a otro u otros drones para la realización de enjambres de drones, como ya se mencionó con anterioridad solo sería necesario mandar dicha información obtenida a través, o bien de bluetooth o de una red Wi-Fi compartida. Lo más lógico y sencillo sería a través de la red Wi-Fi compartida, para ello es necesario conocer la dirección IP de la Raspberry a través de la cual mandar los datos.

En el caso estudiado la IP será: *192.168.1.199*. Conociendo esta IP se consigue tanto monitorizar de manera Remota el dron (A través de VCN como se mencionó en varios casos) o transferir datos a otro aparato o dron que se quiera.

En función de la red Wi-Fi y la Raspberries que se utilicen esas direcciones IP pueden variar, por tanto será necesario ir a la configuración interna de cada ordenador de abordaje en cada caso para configurarlo de manera adecuada.

4.3.- Diseño final

Para dar por finalizado el tema, se ponen en conjunto los elementos y se explica el montaje del dron en cuanto a elementos físicos se refiere. Recogiendo todas las opciones anteriormente mencionadas de cada elemento, se pasara a la elección de los mismos y su implementación.

En lo correspondiente a los elementos electrónicos se toma la Raspberry PI como ordenador de a bordo. La elección se basa en que es un elemento barato y que cubre perfectamente las necesidades requeridas para el proyecto. Este elemento da facilidad a la hora de programarlo ya que se comporta como un ordenador en miniatura y posee gran cantidad de salidas que se pueden utilizar para el quadricóptero. Además, de querer realizar posteriores modificaciones conectando cámara, Wi-Fi,... y demás elementos, posee una gran capacidad de adaptación. Finalmente es ligero, lo que evita que introduzcamos peso innecesario.

Por otro lado, el microcontrolador utilizado, como mencionamos con anterioridad, será el Naze32. Esta elección se lleva a cabo atendiendo a la sencillez, el peso y el precio (como la mayor parte de elecciones). Además, se puede añadir que el microcontrolador Naze32 posee los elementos necesarios para la implementación de nuestro dron, entre los que se encuentran los ya mencionados: Acelerómetro, Giroscopios y Barómetro; que definen perfectamente la posición, el movimiento y el entorno.

La disposición física seguirá la siguiente distribución:

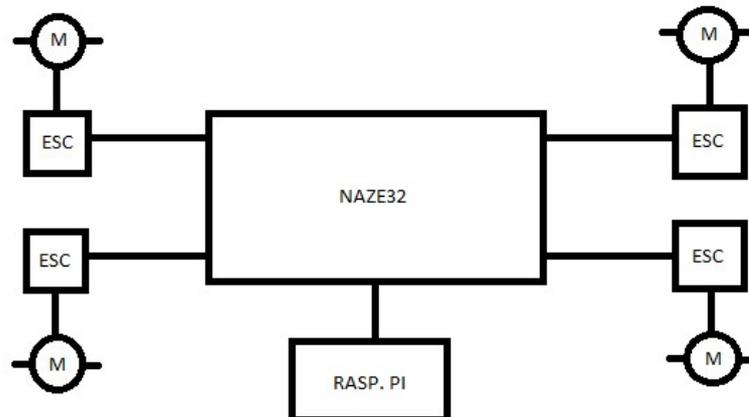


Figura 46 – Esquema físico de los componentes

Lo que se observa en la imagen anterior es la disposición física de los elementos. Esta incluye el controlador, el ordenador de a bordo, los 4 ESC y los 4 motores que moverán las hélices.

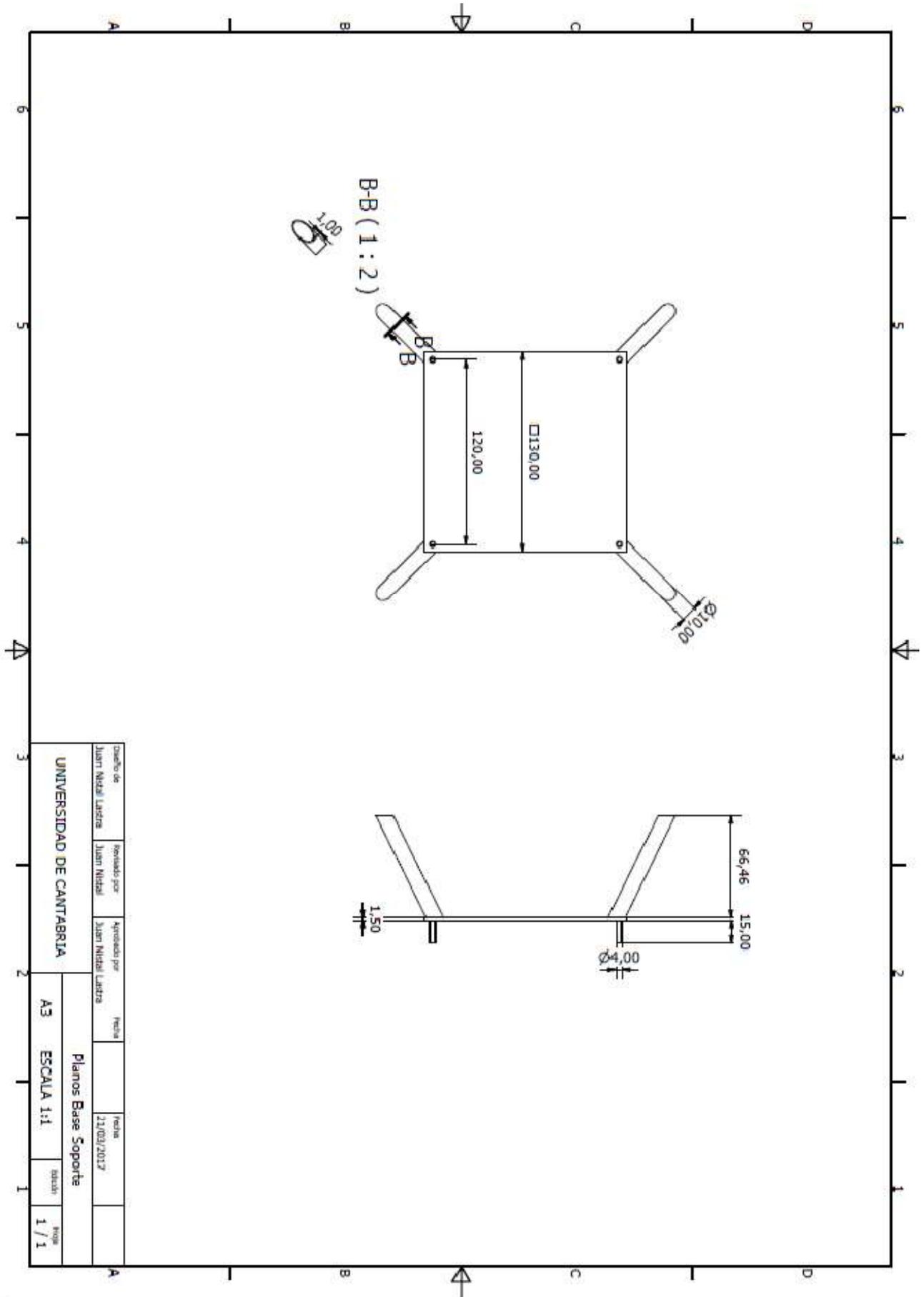
El diseño físico de los elementos (carcasa, soporte,...), está reflejado en la parte de planos, utilizando los materiales anteriormente citados en cada una de sus partes, ya que ciertos componentes requerían ser más resistentes físicamente (soporte), a fatiga (cruceetas) o simplemente para una ligera protección(tapa superior).

DOCUMENTO III

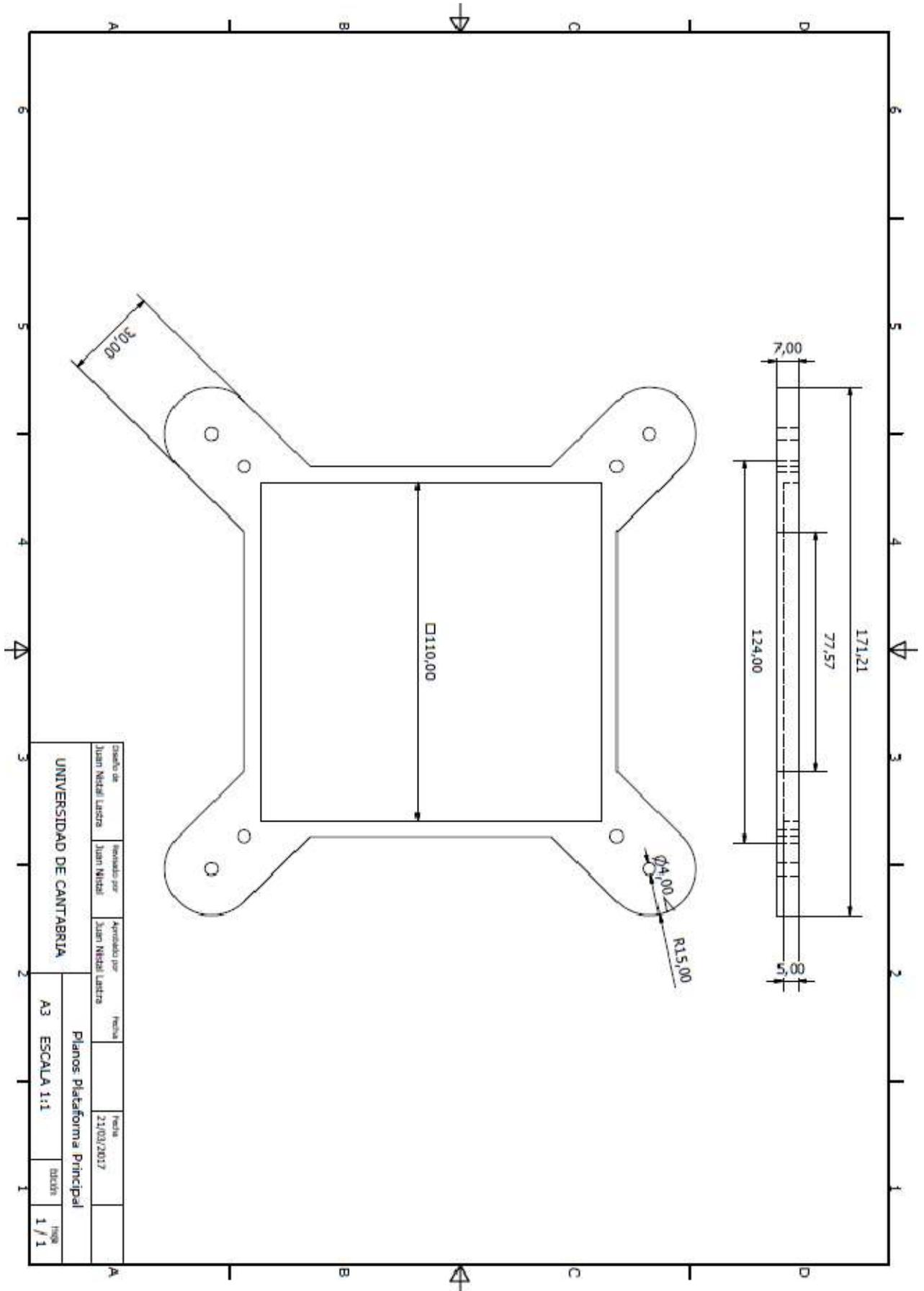
PLANOS

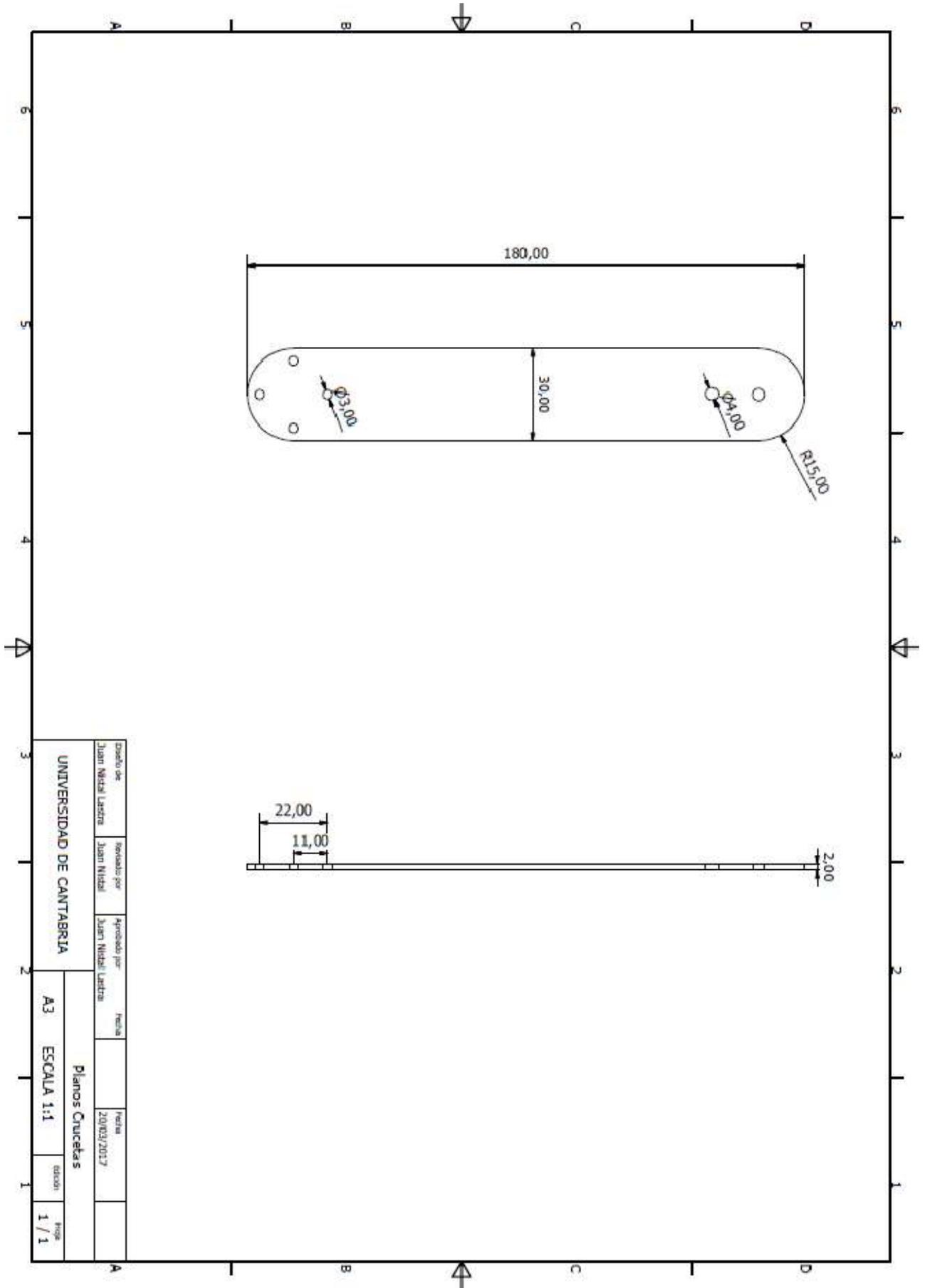
INDICE DE LOS PLANOS

1.- Plano de la Base.....	96
2.- Plano Plataforma.....	97
3.- Plano Cruceta.....	98
4.- Plano Tapa.....	99
5.- Diseño completo.....	100

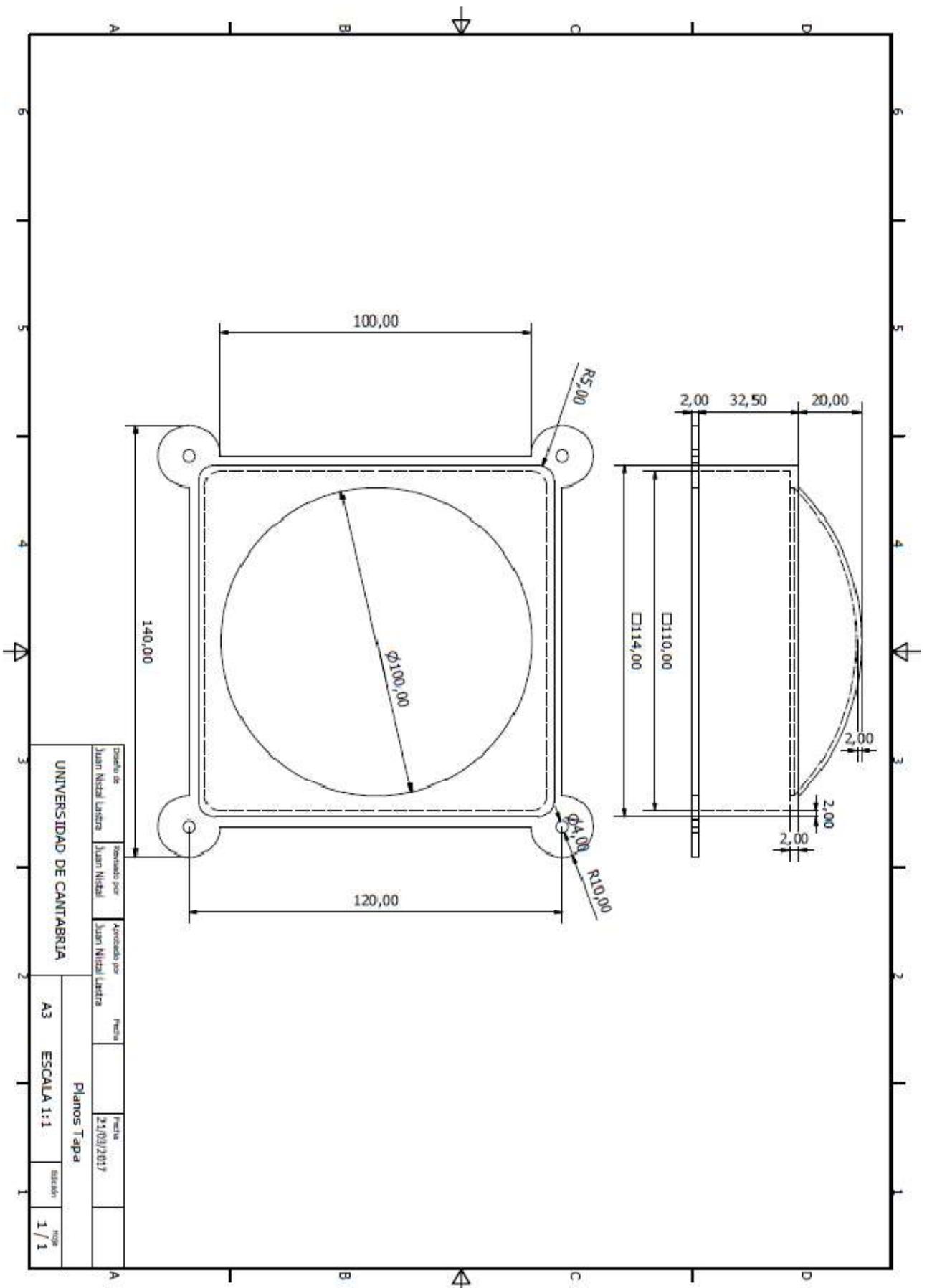


Diseñado por Juan Miguel Lázara	Revisado por Juan Miguel	Aprobado por Juan Miguel Lázara	Fecha 12/03/2017	Hoja 1 / 1
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA			Planos Base Soporte	
A3			ESCALA 1:1	





Dado por Juan Michel Lopera	Reducido por Juan Michel	Aprobado por Juan Michel Lopera	Fecha	Fecha 20/03/2017
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA				
Planos Crucetas				
A3		ESCALA 1:1		Hoja 1 / 1

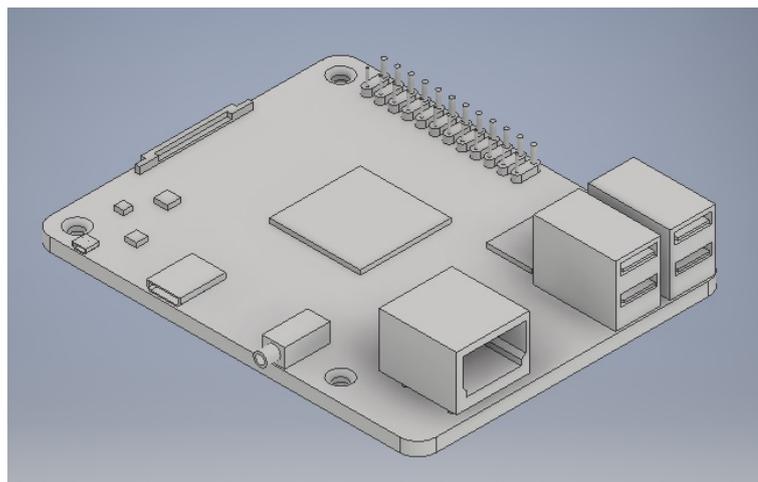


5.- Diseño completo

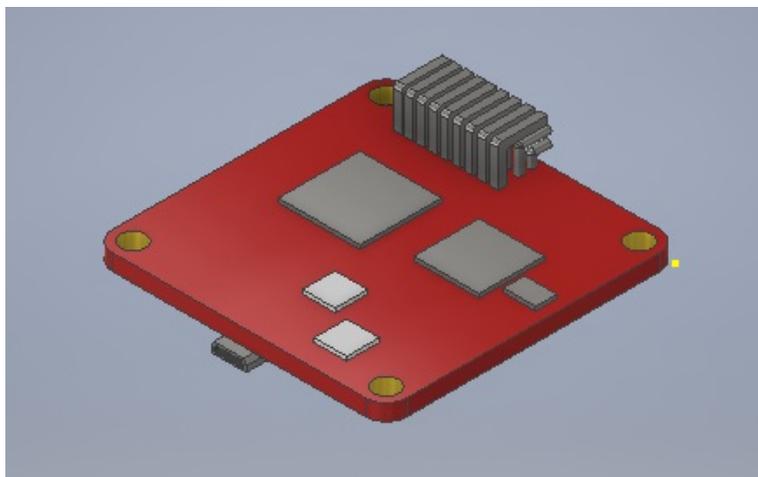
A continuación se muestran los diferentes modelos realizados de los componentes a tamaño real y como sería su montaje e implementación a la hora de la construcción del dron. Primero se pueden observar los modelos 3D de los diferentes componentes realizados con Autodesk Inventor Professional 2017.

En lo correspondiente a los elementos electrónicos de compra directa se dispone principalmente de los siguientes Modelos:

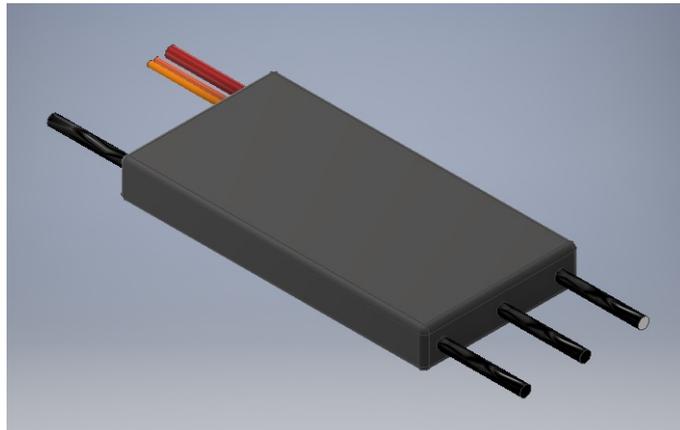
-Raspberry Pi



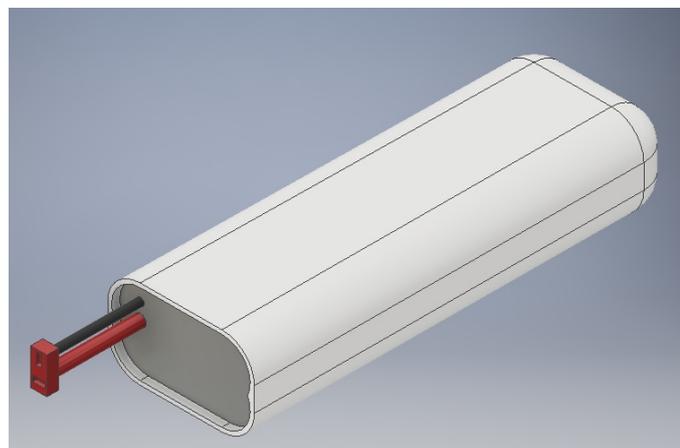
-Naze32



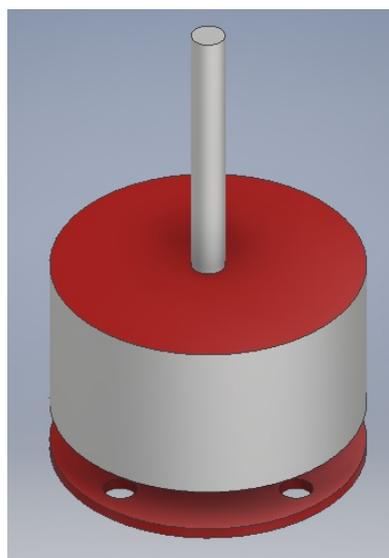
-Variadores (ESC)



-Baterías



-Motores

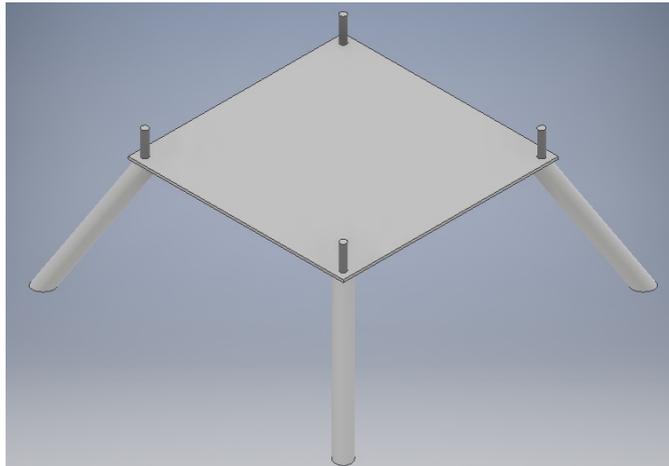


-Hélices

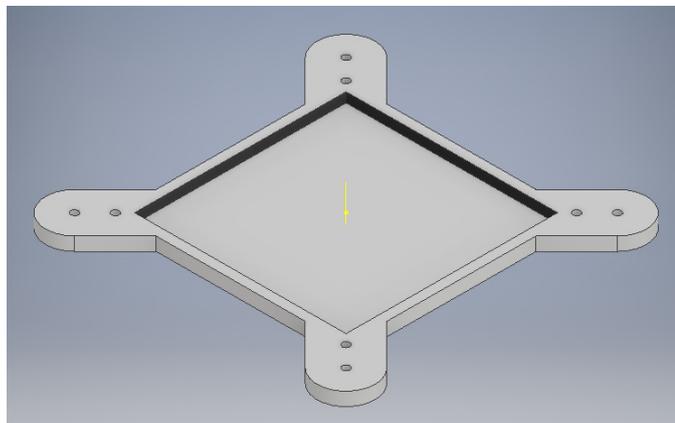


Una vez se dispone de los Modelos 3D realizados a escala de los elementos de compra directa principales, se pasa al modelo 3D de los elementos de fabricación autónoma.

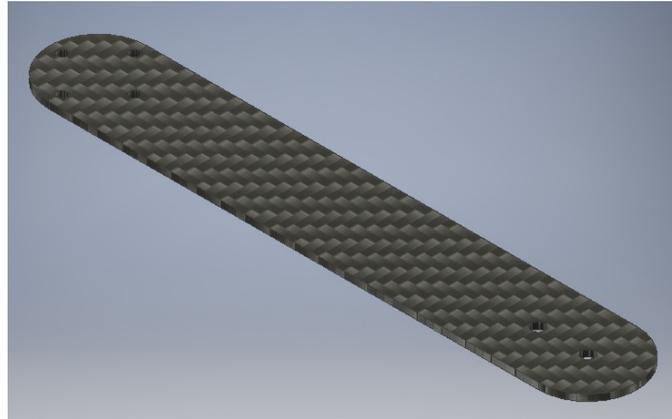
-Soporte



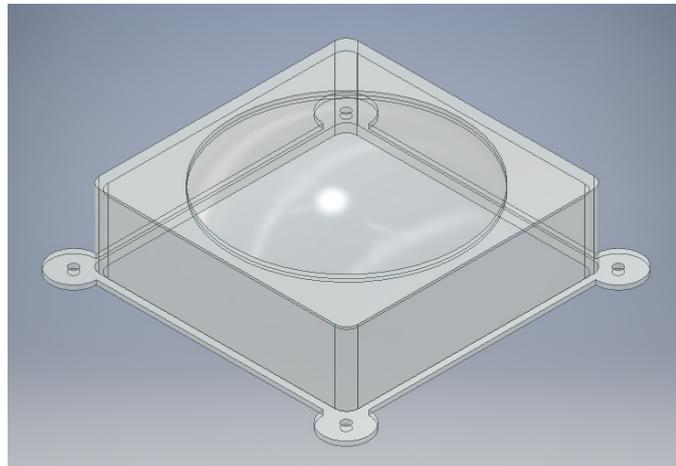
-Plataforma Principal



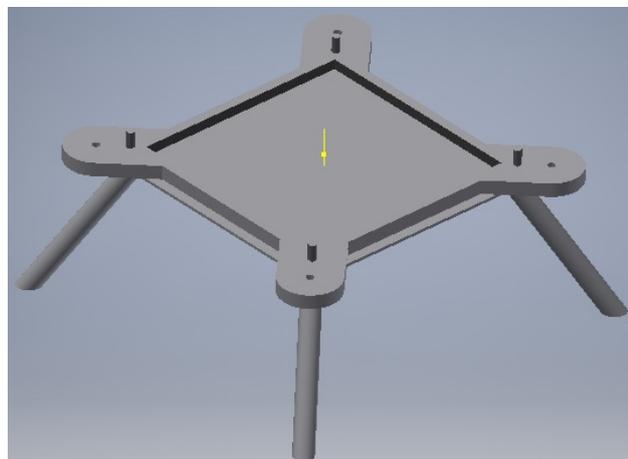
-Cruceatas



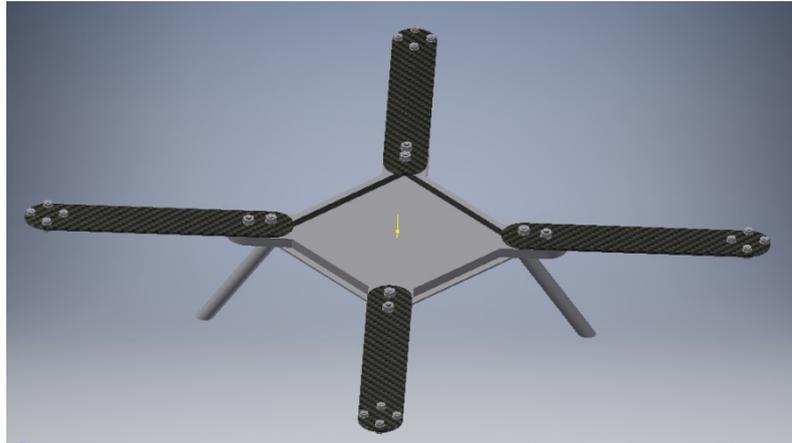
-Tapa de Protección



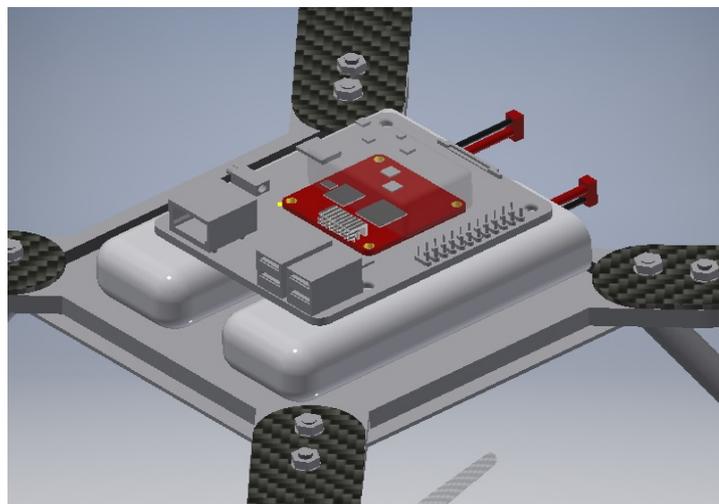
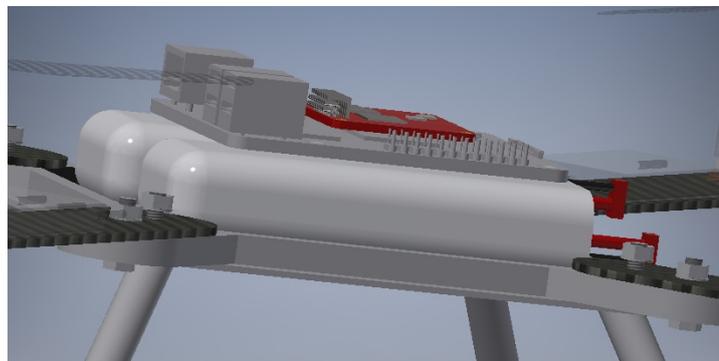
Diseñados todos los componentes principales del cuadricóptero, se pasaría a su ensamblado completo. En primer lugar se coge el soporte, al cual se le acopla la plataforma principal (donde irán colocados casi todos los elementos electrónicos).



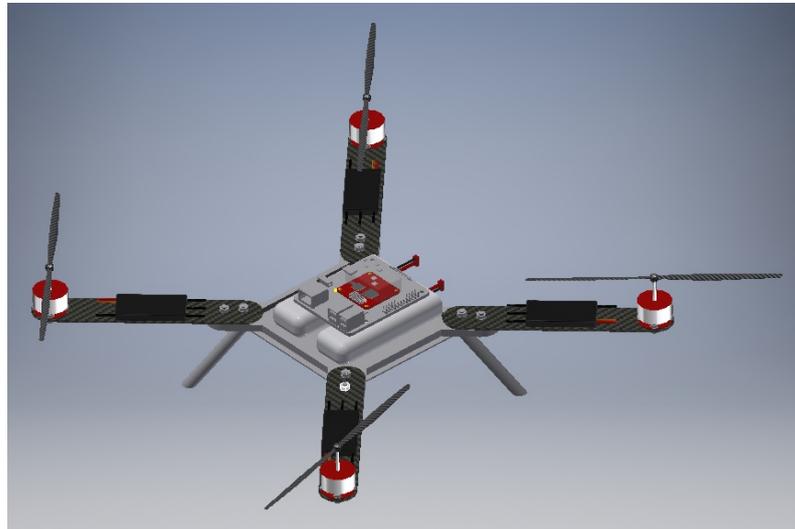
Posteriormente se añadirán las crucetas o brazos del dron.



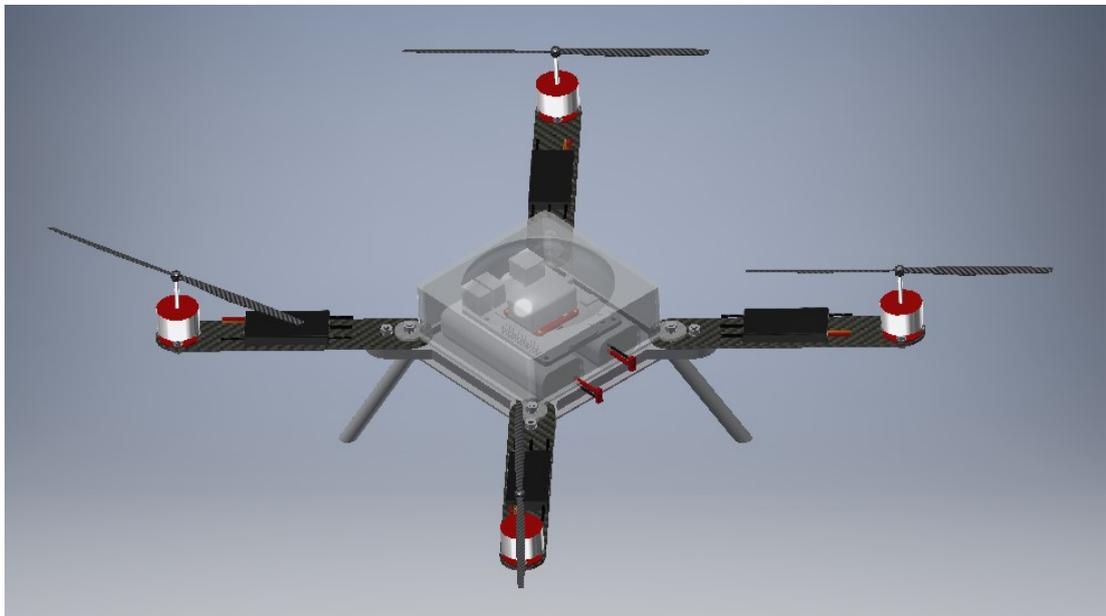
En el centro de la plataforma principal irán colocadas las baterías, la Raspberry Pi, la Naze32 y sus correspondientes cables de conexión (que no se encuentran representados para que las vistas del diseño fueran más nítidas). La separación entre ellas puede variar para evitar contactos innecesarios, ya que la altura de la tapa es suficiente para recoger esa separación. Incluso se podría introducir aislantes térmicos y de vibraciones.



Los variadores se colocarán en las propias crucetas y los motores con sus correspondientes hélices se colocarán en los extremos de las crucetas



Finalmente para darle un aspecto más adecuado y a su vez proteger los elementos electrónicos principales que conforman el cerebro del dron, se hará uso de una tapa protectora



DOCUMENTO IV

PLIEGO DE CONDICIONES

INDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES

1.- Disposiciones Generales.....	108
1.1.- Resumen del Proyecto.....	108
1.2.- Alcance y Aplicabilidad del pliego de Condiciones	
2.- Condiciones Económicas.....	109
3.- Condiciones Legales.....	110
4.- Condiciones Generales Técnicas.....	111
5.- Condiciones Particulares Técnicas.....	112

1.- Disposiciones Generales

1.1.- Resumen del Proyecto

En este proyecto de fin de máster se ha realizado el diseño de un dron o cuadricóptero (helicóptero de 4 hélices) programable y de bajo coste. Este dispondrá de la capacidad de insertar o modificar los programas de control internos para un movimiento autónomo sin necesidad de actuación externa. También dispondrá, en el caso de que se necesite, de la capacidad de interconectarse con otros drones similares para la realización de enjambres de drones o movimientos en grupo coordinados.

Para la realización de este proyecto se ha utilizado una serie de materiales concretos a la hora de la construcción. Se ha fabricado una base y soporte de aluminio a partir de chapas y tubos huecos. Esta decisión fue tomada dado que este material es ligero y resistente, además de ser lo suficientemente barato para no incrementar los costes en exceso.

Para la realización de las crucetas se emplea la fibra de carbono. Se obtienen a partir de unas planchas de Kevlar/Carbono de alta calidad y resistencia de 2mm de espesor. Este material posee las propiedades mecánicas necesarias para la correcta implementación y es de un peso reducido, lo que mejora el rendimiento y tiempo de vuelo.

La tapa se realiza con un material plástico barato y ligero. Simplemente tiene la función de proteger los elementos electrónicos internos. El único requisito es que sea lo suficientemente resistente para soportar pequeños golpes para una mayor protección del interior del cuadricóptero.

1.2.- Alcance y Aplicabilidad del pliego de Condiciones

El pliego de condiciones establece las condiciones mínimas económicas, legales y técnicas que deben satisfacerse para la realización del proyecto.

El ámbito de aplicación del presente documento recoge las etapas de diseño, fabricación y pruebas del prototipo, así como todas las acciones internas o externas que pudieran derivarse de cualquiera de las etapas anteriores.

2.- Condiciones Económicas

El presupuesto obtenido en este proyecto consta de diferentes capítulos entre los que separamos los elementos de compra directa (componentes ya fabricados que se venden independientemente), piezas fabricadas de manera autónoma (puede variar la forma y diseño en función del gusto individual o los recursos de que se disponga) y la mano de obra empleada en la construcción, diseño y programación (para un cuadricóptero básico será suficiente con un ingeniero).

Las condiciones económicas que rodean a este proyecto incluyen también tanto los costes generales (cogiendo un valor de un 10%), así como el beneficio industrial (tomando un valor de 6%). Además se ha tenido en cuenta en el precio de ejecución por contrata el valor del IVA del 21% sobre el presupuesto total de ejecución de material.

3.- Condiciones Legales

La nueva regulación para la utilización civil de las aeronaves controladas por control remoto, modificará el Real Decreto 552/2014. Esta información se puede encontrar en la web del MINISTERIO DE FOMENTO, **permitirá el uso de vehículos aéreos no tripulados o UAVs en zonas urbanas, más allá del alcance visual o hasta operar de noche.**

Ésta se aplicará a las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) de masa máxima al despegue inferior a los 150 kg, regulando el régimen general aplicable en materia de matriculación y aeronavegabilidad, exceptuando las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) de **hasta 25 kg de masa máxima al despegue**, que, no obstante, están sujetas a condiciones específicas para su pilotaje.

Volar en ciudades

Podrán realizarse operaciones sobre aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o reuniones de personas al aire libre, por aeronaves cuya **masa máxima al despegue no exceda de 10 kg**, dentro del alcance visual del piloto (VLOS), a una **distancia horizontal máxima del piloto de 100m**, y a una **altura máxima sobre el terreno no mayor de 120m**. Además de hay que limitar el paso de personas o vehículos o, en otro caso, manteniendo una distancia horizontal mínima de seguridad de 150 m respecto de edificios u otro tipo de estructuras y de 50 m respecto de cualquier persona.

Vuelos dentro del alcance visual aumentado

Para **realizar operaciones a una distancia horizontal superior a 500m**, se establecen las operaciones dentro del alcance visual aumentado (EVLOS) y la figura del **observador**. En estas operaciones el contacto visual directo con la aeronave se satisface utilizando medios alternativos, en particular, observadores en contacto permanente por radio con el piloto.

Vuelos fuera del alcance visual

Podrán realizar vuelos fuera del alcance visual (BVLOS) las aeronaves con un **peso inferior a 2 kg** o aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) que cuenten con sistemas, que permitan a su piloto **detectar y evitar a otros usuarios** del espacio aéreo. También se podrán hacer vuelos BVLOS, con equipos que no dispongan de estos sistemas, en **espacio aéreo segregado**.

Volar de noche

La posibilidad de realizar vuelos nocturnos, hasta ahora prohibidos, con la **autorización expresa de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea**, previa solicitud del operador acompañada del estudio de seguridad.

Volar en espacio aéreo controlado

También se abre la posibilidad de volar en espacios aéreos controlados, siempre a una **distancia superior a 8 km** de cualquier aeropuerto o aeródromo, así como el acceso a espacio aéreo controlado o a una zona de información de vuelo (FIZ). Además, estas operaciones requerirán de un **estudio de seguridad** y de un **radiofonista acreditado**.

4.- Condiciones Generales Técnicas

Como se ha comentado en la elección de los materiales, el material más importante es el utilizado en las crucetas del cuadricótero. Este material tiene que tener una resistencia mecánica y a fatiga aceptable, por eso que se escogió el empleo de Kevlar/Carbono. Otros materiales ligeros como la madera o aluminios en este componente podrían soportar varios vuelos, sin embargo, la resistencia a fatiga que estos pueden aguantar no sería lo suficiente a largo plazo.

Será importante tener en cuenta que los materiales utilizados son, en su mayor parte, electrónicos. Por ello se fabrica una carcasa o tapa protectora, sin embargo, es un prototipo y no está diseñado para el uso en lugares muy húmedos o donde puedan producirse salpicaduras. Dado que es un prototipo experimental no impermeable y será importante mantenerlo alejado de lugares próximos al agua.

5.- Condiciones Particulares Técnicas

El proceso seguido comienza por el diseño de una estructura básica de un cuadricóptero. La parte más importante en el diseño, como se ha comentado, recae en las crucetas o brazos que sostienen los motores y hélices de nuestro dron. Esto lleva a que se haga uso de materiales más resistentes y caros en esas zonas.

A continuación se procede a la programación de la Raspberry Pi para conseguir una correcta comunicación entre ésta y el controlador de vuelo Naze32. Teniendo esto, se pasa a comprobar el funcionamiento de los motores y variadores conectándolos al controlador de vuelo. Es importante realizar estas comprobaciones sin las hélices dado que al no conocer si está hecha la programación y ajuste de manera correcta, no se puede asegurar un funcionamiento seguro de estos. Por seguridad las primeras comprobaciones se realizarán sin hélices.

Cuando se ha comprobado el correcto funcionamiento de los motores, se puede proceder a la sujeción de estos al soporte principal. Se realizaran pruebas de estabilidad de nuevo sin hélices con ellos correctamente fijados a la estructura. Se puede utilizar un simulador para comprobar que el PID de controlador está realizando correctamente su trabajo.

Teniendo todos los valores ajustados se comenzará con una prueba básica donde se programe la elevación y descenso del dron. Esto nos ayudara a asegurarnos que nuestro cuadricóptero posee una estabilidad razonable. Para estas pruebas ya haremos uso de las hélices, pero hay que tener precaución, ya que son elementos que giran a altas velocidades y pueden ocasionar daños graves si no se tratan con cuidado.

A medida que se hacen pruebas y se ajustan los valores se puede pasar a movimientos programados más complejos hasta conseguir que el cuadricóptero realice cualquier desplazamiento que deseemos.

Será necesario siempre manipular el dron con cautela, ya que posee elementos cortantes o que pueden provocar daños graves. Además siempre habrá que colocarse a una distancia de seguridad adecuada para evitar que, en caso de fallos del sistema, puedan producirse accidentes indeseados.

DOCUMENTO V

MEDICIONES

INDICE DE MEDICIONES

CAPITULO 1.....	116
CAPITULO 2.....	117

CAPITULO 1

Este primer capítulo contiene la enumeración de componentes del prototipo que se obtienen a partir de una compra directa. Esto es debido a que este tipo de adquisición es mucho más barata que la fabricación de los mismos.

ID	Descripción	Cantidad
C.1.1	Raspberry Pi	1
C.1.2	Naze32	1
C.1.3	Baterías	2
C.1.4	Variadores	4
C.1.5	Motores	4
C.1.6	Emisor / Receptor RC	1
C.1.7	Helices	4
C.1.8	Cableado	1
C.1.9	Tornillos M3	16
C.1.10	Tornillos M4	4
C.1.11	Tuercas M3	16
C.1.12	Tuercas M4	8
C.1.13	Arandelas	24

CAPITULO 2

Por el contrario el segundo capítulo nos muestra los componentes de fabricación autónoma. Esto quiere decir, aquellos que en lugar de obtenerse directamente a través de una tienda, son de diseño y fabricación casera.

ID	Descripción	Cantidad
C.2.1	Base de Apoyo (Aluminio)	1
C.2.2	Soporte Principal (Aluminio)	1
C.2.3	Crucetas (Fibra de Carbono)	1
C.2.4	Tapa de protección (PVC)	1

DOCUMENTO VI

PRESUPUESTO

INDICE DE PRESUPUESTO

1.- Cuadro de Precios Unitarios.....	120
1.1.- Capítulo 1.....	120
1.2.- Capítulo 2.....	121
1.3.- Capítulo 3.....	122
2.- Presupuestos Parciales.....	123
2.1.- Capítulo 1.....	123
2.2.- Capítulo 2.....	124
2.3.- Capítulo 3.....	125
3.- Presupuesto de Ejecución de Material.....	126
4.- Presupuesto de Ejecución por Contrata.....	127

1.- Cuadro de Precios Unitarios

En primer lugar vamos a proceder a presupuestar los diferentes elementos utilizados en la construcción de nuestro cuadricóptero de manera individual. Para esto lo separaremos en tres capítulos: Capítulo 1 (Elementos de compra directa), Capítulo 2 (Elementos fabricados) y Capítulo 3 (Coste de la Mano de obra).

1.1.- Capítulo 1

La siguiente tabla muestra los elementos de compra directa.

ID	Unidades	Descripción	Precio Unitario Cifra	Precio Unitario Letra
C.1.1	Item	Raspberry Pi	39,90 €	Treinta y nueve euros con noventa céntimos
C.1.2	Item	Naze32	15,89 €	Quince euros con ochenta y nueve céntimos
C.1.3	Item	Baterías	23,00 €	Veintitrés euros
C.1.4	Item	Variadores	16,91 €	Dieciseis euros con noventa y un céntimos
C.1.5	Item	Motores	16,90 €	Dieciseis euros con noventa céntimos
C.1.6	Item	Emisor / Receptor RC	49,00 €	Cuarenta y nueve euros
C.1.7	Item	Helices	2,75 €	Dos euros con setenta y cinco céntimos
C.1.8	Item	Cableado	5,00 €	Cinco euros
C.1.9	Item	Tornillos M3	0,03 €	Trés céntimos de euro
C.1.10	Item	Tornillos M4	0,03 €	Trés céntimos de euro
C.1.11	Item	Tuercas M3	0,03 €	Trés céntimos de euro
C.1.12	Item	Tuercas M4	0,03 €	Trés céntimos de euro
C.1.13	Item	Arandelas	0,03 €	Trés céntimos de euro

1.2.- Capítulo 2

Como mencioné con anterioridad, el capítulo 2 comprende los elementos fabricados de manera autónoma y que no se pueden comprar directamente.

ID	Unidades	Descripción	Precio Unitario Cifra	Precio Unitario Letra
C.2.1	Item	Base de Apoyo (Aluminio)	8,26 €	Ocho euros con veintiseis céntimos
C.2.2	Item	Soporte Principal (Aluminio)	26,95 €	Veintiseis euros con noventa y cinco céntimos
C.2.3	Item	Crucetas (Fibra de Carbono)	19,67 €	Diecinueve euros con sesenta y siete céntimos
C.2.4	Item	Tapa de protección (PVC)	6,00 €	Seis euros

1.3.- Capítulo 3

En este capítulo se recoge en precio unitario por hora de la mano de obra. Debido a que es un proceso bastante sencillo de construcción, no será necesario el empleo de mano de obra adicional.

ID	Descripción	Precio Unitario Cifra	Precio Unitario Letra
C.3.1	Mano de Obra de Ingeniero	16,00 €/h	Dieciseis euros / hora

Fdo.: Juan Nistal Lastra

2.- Presupuestos Parciales

A continuación agruparemos las cantidades de cada uno de los elementos para conocer el valor total.

2.1.- Capítulo 1

En primer lugar, al igual que hicimos con los precios unitarios, comenzamos calculando el total del valor correspondiente a los elementos comprados de modo directo en tienda.

ID	Unidades	Descripción	Cantidad	Precio Unitario Cifra	Total
C.1.1	Item	Raspberry Pi	1	39,90 €	39,90 €
C.1.2	Item	Naze32	1	15,89 €	15,89 €
C.1.3	Item	Baterías	2	23,00 €	46,00 €
C.1.4	Item	Variadores	4	16,91 €	67,64 €
C.1.5	Item	Motores	4	16,90 €	67,60 €
C.1.6	Item	Emisor / Receptor RC	1	49,00 €	49,00 €
C.1.7	Item	Helices	4	2,75 €	11,00 €
C.1.8	Item	Cableado	1	5,00 €	5,00 €
C.1.9	Item	Tornillos M3	16	0,03 €	0,51 €
C.1.10	Item	Tornillos M4	4	0,03 €	0,12 €
C.1.11	Item	Tuercas M3	16	0,03 €	0,48 €
C.1.12	Item	Tuercas M4	8	0,03 €	0,24 €
C.1.13	Item	Arandelas	24	0,03 €	0,72 €
				CAPITULO 1	304,10 €

2.2.- Capítulo 2

En segundo lugar, al igual que hicimos con los precios unitarios, calculamos el valor total de cada una de las piezas fabricadas.

ID	Unidades	Descripción	Cantidad	Precio Unitario Cifra	TOTAL
C.2.1	Item	Base de Apoyo (Aluminio)	1	8,26 €	8,26 €
C.2.2	Item	Soporte Principal (Aluminio)	1	26,95 €	26,95 €
C.2.3	Item	Crucetas (Fibra de Carbono)	1	19,67 €	19,67 €
C.2.4	Item	Tapa de protección (PVC)	1	6,00 €	6,00 €
				CAPITULO 2	60,88 €

2.3.- Capítulo 3

Por último faltaría llevar a cabo el cálculo del coste total de las horas de trabajo del ingeniero. Para ello cogeremos el precio unitario de la mano de obra y la multiplicaremos por las horas de trabajo que lleva realizar la construcción y diseño del dron.

ID	Descripción	Cantidad	Precio Unitario Cifra €/h	TOTAL
C.3.1	Mano de Obra de Ingeniero	50 horas	16,00 €	800,00 €

3.- Presupuesto de Ejecución de Material

A continuación queda calcular el valor económico de la construcción de manera total. Con esto sumaremos los valores de todos los Presupuestos parciales para el cálculo de un Presupuesto de ejecución de Material.

<u>Presupuestos Parciales</u>	
CAPITULO 1 (Compra Directa)	304,10 €
CAPITULO 2 (Elementos Constructivos)	60,88 €
CAPITULO 3 (Mano de Obra)	800,00 €
Total Precio Ejecución Material	1164,98 €

El coste del Presupuesto de Ejecución de Material asciende a **mil ciento sesenta y cuatro euros con noventa y ocho céntimos.**

4.- Presupuesto de Ejecución por Contrata

Por último falta realizar el coste total del prototipo incluyendo impuestos, gastos generales y beneficios.

Presupuesto de Ejecución de Material	1164,98 €
Gastos Generales (10%)	116,50 €
Beneficio Industrial (6%)	69,90 €
Total Parcial	1351,38 €
IVA (21%)	283,79 €
Presupuesto Eje. Contrata	1635,17 €

El coste del Presupuesto de Ejecución por Contrata asciende a **mil seiscientos treinta y cinco euros con diecisiete céntimos.**

Fdo.: Juan Nistal Lastra

DOCUMENTO VII

REFERENCIAS / BIBLIOGRAFÍA

Referencias / Bibliografía

- K. ASTROM and T.HAGGLUND. 2nd Edición (1995); *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Ed. North Carolina.
- P.CASTILLO, P.GARCIA, R.LOZANO, P.ALBERTO; *Modelado y estabilización de un helicóptero con cuatro rotores*. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 4, núm.1, 2007.
- *Origen y Desarrollo de los Drones*. 2015. Universidad de Valencia. [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <http://drones.uv.es/origen-y-desarrollo-de-los-drones/>
- BONELLI, M. 2016. Historia de los Drones. En: *Mundo Dron* . [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <http://mundrone.blogspot.com.es/p/historia-de-los-drones.html>
- *History of Quadcopters*. 2016. KROSSBLADE AEROSPACE. [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <http://www.krossblade.com/history-of-quadcopters-and-multirotors/>
- *Multicópteros: Vuelos estables* [en línea]. 2017. Revista Gadget [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <http://www.revista-gadget.es/reportaje/multicopteros-vuelos-estables/>
- *Raspberry Pi Model 3*. 2017. Raspberry Pi. [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>

· *Naze32: Configurar PID*. 2014. MicroQuadFPV. [Consulta: 11 Abril de 2017]. Disponible en: <http://microquadfpv.com/?p=383>

· *Tutorial: configura tu Acro NAZE32 con Baseflight. Parte I*. 2015. Drones De Carreras. [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <http://dronesdecarreras.com/tutorial-configura-tu-acro-naze32-flip32-con-baseflight-primera-parte/>

· *Tutorial: configura tu Acro NAZE32 con Baseflight. Parte II*. 2015. Drones De Carreras. [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <http://dronesdecarreras.com/tutorial-configura-tu-acro-naze32-flip32-con-baseflight-segunda-parte/>

· *NCYT: Avances hacia los Drones del futuro* [en línea]. 2014. ISSN 2013-6714. [Consulta en línea: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <http://noticiadelaciencia.com/not/10492/avances-hacia-los-drones-del-futuro/>

· *Que dron comprar según el presupuesto*. 2016. XATAKA. [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <https://www.xataka.com/especiales/que-drone-comprar-segun-el-presupuesto-27-modelos-para-elegir-de-20-a-2500-euros>

· *The quadcopter: how to compute the pitch, roll and yaw*. 2012. The Bored Engineers. [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <https://theboredengineers.com/2012/09/19/the-quadcopter-get-its-orientation-from-sensors/>

· HUMBERTO LUQUE, M. 2015. *Diseño y Construcción de un Vehículo Aéreo no Tripulado*. Trabajo de Investigación. Universidad Nacional de Ingeniería de Lima. PERÚ. [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: http://www.inifim.uni.edu.pe/intranet/uploaded/20151118/docum_20151118_221529_177zv_informe_final_proyecto_de_investigacion_dise_o_y_construcci_n_de_un_veh_culo_a_reo_no_tripulado.pdf

· *Flying from Computer*. 2015. ALTAX. [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <https://altax.net/blog/flying-from-computer/>

· PEDLY, M: *Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer [en línea]*. 2013. NXP. N°: AN3461. Rev. 6 03/2013.[Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/application-notes/AN3461.pdf>

· Moyano Díaz, S: *Diseño y Construcción de un Quadcopter*. 2002. Memoria. Universidad Politécnica de Cataluña. [Consulta: 11 de Abril de 2017]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21902/102664.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

