

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Trabajo final de grado

Diseño e implementación de una plataforma de
test para drones bimotores TILT rotor

MEMORIA

Junio, 2018

Autor: José Javier Pérez Olivares

Tutor: Sergio García-Nieto Rodríguez



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Agradecimientos:

En primer lugar, quiero agradecer la ayuda brindada a todas las personas que me sirvieron de inspiración y facilitaron que este proyecto se pudiera llevar cabo. A los profesores a los que transmití mi deseo de realizar este proyecto y me aconsejaron y, por supuesto, a Sergio García-Nieto Rodríguez, el tutor de este trabajo y quien siempre estuvo a mi disposición para cualquier duda que me asaltara, que no fueron pocas.

También quiero que mi familia, y particularmente mis padres y mi hermana, tengan un lugar en esta parte inicial del documento. Ellos me ayudaron a superar los momentos difíciles y me han brindado una maravillosa oportunidad para disfrutar de la vida. Sin ellos, ninguno de los objetivos alcanzados hubiera sido posible.

Gracias a todos.

Resumen: (1 página)

El objetivo de este proyecto de final de grado es la fabricación desde cero de un dron bimotor que ayudado de dos servomotores tenga plenas facultades de vuelo, así como de una plataforma de test para el propio dron. El concepto de diseño es que el objeto volador disponga de un despegue y aterrizaje vertical y también pueda modificar la posición de los motores para volar de forma longitudinal, como lo hace un avión convencional.

Para realizar el trabajo anteriormente descrito, se estudiaron previamente los componentes eléctricos y de construcción para dimensionar el dron. Para la elección de dichos componentes se ha hecho su uso de páginas especializadas (que serán posteriormente nombradas) y los propios conocimientos del tutor.

Dada la magnitud del proyecto y al gran tiempo dedicado a las labores de diseño y fabricación del propio aparato y estructuras para reducir la dificultad del problema de control, el proyecto comenzó en junio de 2017 y ha sido recientemente terminado. Los resultados han sido satisfactorios, ya que ahora se tiene un conocimiento mucho mayor de la dinámica de vuelo y control de este tipo de drones que no son comunes. Pese a esto, se sigue trabajando para dar al proyecto una dimensión mayor y que pueda servir de ayuda para otros compañeros de profesión.

Abstract: (1 página)

The objective of this degree final project is the fabrication from scratch of a bi-motor drone that helped by two servo-motors could fly with full capabilities, as well as a test bank to program the drone. Design' concept is this fly object disposes a vertical take-off and landing y also could modify motor's position to fly longitudinally, like a conventional plane does.

To complete the previously described project, electronics and construction components were studied to size the drone. Information resources to select that components were specialized websites and our knowledge with other previous projects.

With this project magnitude and the big time we have dedicated to design and construction of the drone and structures to help with control project, work started at June 2017 and has finished recently. Results have been satisfactory, due to now we have a much bigger knowledge about this unusual type of drones. Instead of that, we continue working to give a major dimension to the project and help other professional with this kind of flying objects.

Resum: (1 pàgina)

Aquest projecte de final de grau té com objectiu la fabricació desde zero d'un dron bimotor que ajudat per dues servomotors tinga plenes facultats de vol, asi com una plataforma de proves per a programar el propi dron. El concepte de diseny és que el objecte volador pugua fer un despegament y aterratge vertical, pero pugua canviar la posició dels motors per tindre un desplaçament longitudinal com el d'un aeroplà convencional.

Per a realitzar el treball anteriorment descrit, es van estudiar previament els components elèctrics y mecànics per dimensionar el dron. Les fonts d'informació van ser pàgines web especialitzades que apareixeràn a la biografia i els propis coneixements del tutor.

Debut a la grandària del projecte y al temps dedicat a les labors de diseny y fabricació del propi aparat i de les estructures auxiliars fetes per facilitar el problema de control, el nostre treball va començar en juny de 2017 i ha finalitzat fa apenes unes setmanes. Els resultats han sigut satisfactoris, ja que ara es té un coneixement molt superior de la dinàmica de vol y control a aquest tipus de drons que no son comuns. A pesar d'aixó, es continua treballant per a donar al projecte una major dimensió i que pugua ser utilitzat com a ajuda per a altres companys de professió.

Índice general de la memoria:

1.	Introducción	12
2.	Objetivos y alcance del proyecto	13
3.	Antecedentes	15
4.	Condicionantes, limitaciones y recursos disponibles.....	19
5.	Soluciones alternativas.....	21
6.	Solución adoptada.....	32
6.1.	Frame	32
6.1.1	Diseño.....	32
6.1.2	Fabricación: Impresión 3D.....	35
6.1.3	Ensamblaje del dron.....	37
6.2.	Plataforma de pruebas.....	41
6.3.	Motores.....	43
6.4.	Hélices	45
6.5.	Batería	46
6.6.	Variadores de velocidad: ESC.....	47
6.7.	Placa de potencia	48
6.8.	Controladora de vuelo: Beagle Bone Blue	50
6.9.	Emisora y receptor de radio	52
6.10.	Situación y conexión de los componentes electrónicos	55
7.	Desarrollo del control.....	58
7.1.	Presentación del sistema	58
7.2.	Modificaciones en ArduPilot.....	59
7.3.	Configuración de la placa	60
7.4.	Elaboración de la función Stabilice_vtol_cpoh	61
7.5.	Conexión de la controladora de vuelo	63
7.6.	Control del cabeceo	66
7.7.	Modificación de la referencia.....	69
8.	QGroundControl.....	71
9.	Resultados Obtenidos	74
10.	Conclusiones.....	77
11.	Bibliografía	79

Índice de ilustraciones:

Ilustración 1: Esquema del Dron Bimotor Tilt Rotor	14
Ilustración 2: V22 Osprey	15
Ilustración 3: Bell XV-15	16
Ilustración 4: Agusta Westland AW609.....	17
Ilustración 5: Weserflug WP 1003.....	17
Ilustración 6: Impresora 3D Cube Pro Duo.....	19
Ilustración 7: Avión de madera de balsa.....	21
Ilustración 8: Fibra de carbono en McLaren P1	22
Ilustración 9: TMotor MN1806.....	24
Ilustración 10: TMotor F60.....	25
Ilustración 11: ESC Spedix 30A	26
Ilustración 12: Microcontroladora CC3D.....	27
Ilustración 13: Microcontroladora PX4	28
Ilustración 14: Alambre para jaula	30
Ilustración 15: Jaula para cuadricóptero.....	31
Ilustración 16: Medio chasis.....	32
Ilustración 17: Soporte de los motores	33
Ilustración 18: Soporte del motor	34
Ilustración 19: Rueda de protección	34
Ilustración 20: Ensamblaje del dron.....	35
Ilustración 21: Partes de una impreso 3D	36
Ilustración 22: Rueda y soportes de motor impresos	37
Ilustración 23: Chasis unido con servos	38
Ilustración 24: Barra de fibra de carbono	38
Ilustración 25: Dron con motores	39
Ilustración 26: Soporte con motor anclado 1.....	40
Ilustración 27: Soporte con motor anclado 2.....	40
Ilustración 28: Diseño de la plataforma de test	41
Ilustración 29: Plataforma de test fabricada y montada.....	42
Ilustración 30: Motor	43
Ilustración 31: Exitación de un motor brushless.....	44
Ilustración 32: Tabla de funcionamiento del EMAX RS2205	44
Ilustración 33: Hélices	45
Ilustración 34: Rendimiento de las hélices.....	46
Ilustración 35: Batería	46
Ilustración 36: Variadores de velocidad.....	47
Ilustración 37: Modulación PWM Motores - Copyright Owenson.me.....	48
Ilustración 38: Placa de potencia	49
Ilustración 39: Beagle Bone Blue.....	50
Ilustración 40: Diagrama PIN OUT.....	51
Ilustración 41: Cableado en la Beagle Bone Blue.....	51
Ilustración 42: Emisora FlySky FS-16X.....	52
Ilustración 43: Ejes de rotación del dron	52

Ilustración 44: Modos de vuelo.....	53
Ilustración 45: Receptor	54
Ilustración 46: Modulación PPM	54
Ilustración 47: Situación de la electrónica	55
Ilustración 48: Situación de la batería.....	56
Ilustración 49: Esquema de conexiones electrónicas	56
Ilustración 50: Montaje completo del dron	57
Ilustración 51: Esquema de control.....	58
Ilustración 52: Esquema de ArduPilot.....	60
Ilustración 53: Tabla de salida de servos.....	63
Ilustración 54: Wifi BeagleBone Blue	63
Ilustración 55: Ejecutar código arduplane	65
Ilustración 56: QGround vista general	65
Ilustración 57: Esquema de control.....	66
Ilustración 58: Respuesta a escalo en BC.....	66
Ilustración 59: Esquema del regulador PD	68
Ilustración 60: Acceso directo a QGround	71
Ilustración 61: Horizonte artificial o indicador de actitud	71
Ilustración 62: Ajustes QGround	72
Ilustración 63: Parámetros del QGround	72
Ilustración 64: Editor de parámetros del QGround.....	73
Ilustración 65: Respuesta del dron con 16% de acelerador.....	74
Ilustración 66: Respuesta del dron con 20% de acelerador.....	75
Ilustración 67: Respuesta del dron combinada.....	75
Ilustración 68: Grafica de seguimiento de referencias cambiantes.....	76

1. Introducción

Hace años que los drones dejaron de ser un aparato exclusivo para uso militar y pasaron a formar parte de la industria e incluso de la vida de las personas como hobby. Sin embargo, que los drones estén normalizados en nuestra sociedad no quiere decir que su proceso de evolución se haya detenido.

La forma más económica de conseguir un dron en la actualidad es acceder a un cuatrirotor o cualquier otra aeronave de disposición de los motores vertical y fija. El vuelo de estos aparatos podría compararse con el de un helicóptero, con la diferencia de que el gran número de propulsores mejora la estabilidad y facilita el vuelo.

No obstante, la forma más sencilla de diseñar un dron no es la más eficiente si hablamos en términos de energía consumida. El tipo de vuelo más funcional es aquel en el que no se necesita una gran área para despegar y aterrizar y se pueden recorrer grandes distancias con el mínimo gasto energético.

Los convertiplanos y los aviones de motor rotativo han constituido importantes proyectos a lo largo de la historia de la ingeniería, pero hay algunos motivos que imposibilitaron que se implantaran como aeronaves comunes.

2. Objetivos y alcance del proyecto

En este proyecto se abarcará el problema del diseño y la construcción de un dron que con 2 motores y 2 servos tenga facultades para despegar y aterrizar verticalmente (como cualquier otro dron), pero también tenga la capacidad de modificar la posición de los motores para aproximarse al vuelo de un avión cuando se requiera recorrer mayores distancias. De igual forma, se construirá una plataforma para el test para este tipo de drones bimotores TILT rotor.

Debido a la complejidad de esta tarea, los subobjetivos pormenorizados del trabajo serán:

- Diseño del dron
- Construcción del dron
- Diseño del sistema electrónico
- Configuración del sistema electrónico
- Diseño de un controlador para uno de los movimientos del dron
- Prueba de dicho controlador

Tras estudiar las necesidades y los medios disponibles para llevar a cabo el trabajo, se determinó que la forma más adecuada para la construcción del dron era imprimirlo en 3D. A partir de este punto, se comenzó el proceso de diseño en el que, no sólo se tuvo en cuenta la adecuación al modelo, sino también la facilidad para la posterior impresión y, sobre todo, la resistencia a impactos.

La característica diferencial del chasis del dron es que debía estar preparado para alojar 2 servomotores y una barra pasante de fibra de carbono que junto a unas ruedas de protección en los extremos configuraría el principal sistema de seguridad para proteger el chasis y toda la electrónica colindante a dicha superficie. De esta forma, el esquema de la construcción que se realizó es el siguiente:

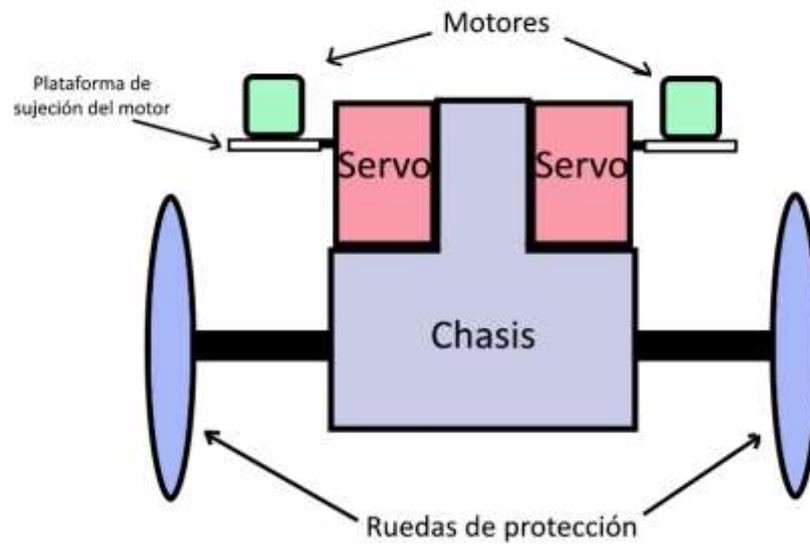


Ilustración 1: Esquema del Dron Bimotor Tilt Rotor

Como se puede apreciar en el anterior esquema, la forma de equilibrar el dron sería el movimiento coordinado de los dos servos y el ajuste de la potencia de los dos motores.

Además de las dos ruedas de protección para proteger el chasis, se acordó proteger las hélices y su entorno con unas piezas de fibra de carbono que estarán situadas entre los soportes para los motores y los propios motores.

De esta forma, se llegó a un primer concepto sólido con el que se podía comenzar a diseñar. Asimismo, la idea de fabricar una plataforma para las pruebas tiene como objetivo evitar daños sobre el frame durante la fase inicial de los test de vuelo real.

3. Antecedentes

En el estudio de la viabilidad de este proyecto, se realizó una excelsa búsqueda de información a través de distintas fuentes para conocer modelos de aeronaves con una tecnología similar que lograran ser producidos y tuvieran un uso regular.

A lo largo de la historia, pese a que los convertiplanos son un tipo de aeronave extraño y residual, ha habido grandes potencias mundiales que apostaron por el vuelo de estas aeronaves de rotores basculantes. Algunos de los ejemplos existentes son, de mayor a menor utilización Bell-Boeing V22 Osprey (al que dedicaremos una mayor importancia), Bell XV-15, AgustaWestland AW609 y el Weserflug WP 1003 desarrollado por los nazis que no se llegó a utilizar.

El Bell-Boeing V22 Osprey, producido por Bell y Boeing, dos de las mayores empresas de helicópteros y aviones del mundo. El objetivo del diseño y la fabricación de esta aeronave era conseguir un avión de uso militar que dispusiera de un aterrizaje y despegue vertical y realizara los desplazamientos de largo alcance como un avión convencional, es decir, la esencia del diseño del V22 Osprey es la misma que la del dron bimotor que se pretende fabricar.



Ilustración 2: V22 Osprey

Sin embargo, en los 20 años de utilización del V22 Osprey se han contabilizado un total de 10 accidentes, algunos de ellos muy graves como el sufrido en Arizona en abril del 2000, donde murió toda la tripulación de marines al atascarse el rotor derecho.

En distintas fuentes se apunta a la dificultad de aeronavegabilidad y cuyos accidentes han estado en su inmensa mayoría provocados por las dificultades que tiene para maniobrar.

Pese a esto, el V22 Osprey es un avión en activo utilizado por el ejército de Estados Unidos, quienes cuentan con más de una centena de aeronaves, y también por Japón, país que adquirió 17 unidades hace 3 años. Por tanto, se trata de la aeronave Tilt Rotor más versátil jamás construida, con capacidad para transportar más de una treintena de militares e incluso 1 vehículo de desplazamiento terrestre.

- Bell XV-15: Se trata del predecesor del V22 Osprey. Su desarrollo comenzó en 1971 y el primer vuelo se realizó en 1977.



Ilustración 3: Bell XV-15

- Agusta Westland AW609: Fue desarrollado de manera conjunta entre Bell y Agusta Aerospace Company a partir de la segunda mitad de la década de los 90. Se trata de una aeronave de uso civil que tuvo como punto de partida el Bell XV-15. En la actualidad tiene fabricación italiana llevada a cabo por Leonardo SPA.



Ilustración 4: Agusta Westland AW609

- Weserflug WP 1003: Se trata de una aeronave desarrollada por los nazis durante la segunda guerra mundial. La particularidad de este avión es que, al contrario que el resto de aeronaves en las que únicamente rotan los motores, en este caso rota aproximadamente la mitad exterior del cuerpo del ala.

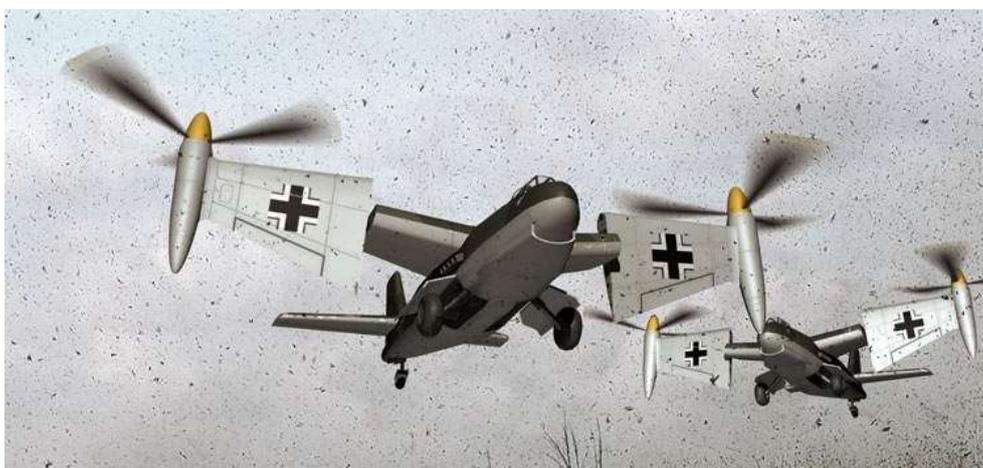


Ilustración 5: Weserflug WP 1003

Estudiar los antecedentes de este proyecto fue una forma de conocer distintas aproximaciones y comprender que estos aparatos Tilt Rotor son casi tan complejos como eficientes.

Una vez conocidos los antecedentes, se comenzó el dimensionamiento del dron, es decir, se establecieron una serie de parámetros como son el peso y las dimensiones. Además, se acordaron los métodos de fabricación con los que se llevó a cabo este proyecto de final de grado.

4. Condicionantes, limitaciones y recursos disponibles

Para transformar los diseños en piezas físicas que formaran el dron, se hizo uso de impresoras 3D. Estos dispositivos siguen un trazado punto a punto en el que, calentando el plástico utilizado (en nuestro caso PLA), se forma una estructura capa a capa.

La temperatura del plástico que sale del extrusor, el tipo de ventilación y la temperatura de la cama (lugar sobre el que reposa la pieza) hace muy difícil y en ocasiones inviable que se puedan imprimir estructuras con voladizos.

Este condicionante se consideró para el diseño de las distintas piezas que forman el dron y, por ello, en 2 de las 3 que se fabricaron no existe ningún tipo de parte voladiza, es decir, sin capas de impresión que sirvan de soporte.



Ilustración 6: Impresora 3D Cube Pro Duo

Los recursos disponibles para llevar a cabo el proyecto fueron:

- Licencia de estudiante de AutoDesk Inventor Profesional 2015
- Aplicación de Windows 10: 3D Builder
- Uso del taller del DISA para el montaje del dron
- Uso del Laboratorio del ai2 para el almacenamiento de piezas y test
- Impresoras Da Vinci y CubePro Duo del ai2
- El código base: ArduPlane

En el capítulo 6 de esta memoria se describe la fabricación de las diferentes partes y la construcción paso a paso del dron como conjunto. Una vez completado el diseño estructural del dron, se inició la fase de impresión y en este mismo instante se realizaron los pedidos de los componentes electrónicos necesarios para completar el montaje.

5. Soluciones alternativas

Tanto en la fase de concepción del proyecto como tras el diseño, fueron estudiadas diferentes posibilidades para la fabricación del dron y de la plataforma, el tipo de emisora y receptor o el modelo de controladora de vuelo. En este apartado, se exponen las alternativas no escogidas y el criterio seguido para dicha selección.

Material de fabricación del dron:

- Madera de balsa: La madera de balsa es un material de fabricación muy común para aplicaciones de aeromodelismo, más específicamente para aviones. La madera de balsa es la madera más ligera que se conoce, con una densidad de entre 0,10 y 0,15 g/mL.



Ilustración 7: Avión de madera de balsa

El reducido peso de este material unido a la facilidad de reparación hace que esta sea una alternativa muy valorada, aunque no idónea por diversos motivos. Dadas las dimensiones del dron se requieren piezas de tamaño reducido y gran detalle, características a las que la madera de balsa no se adapta correctamente. Además, el alto detalle de las piezas requeriría corte por láser, cuyo coste es elevado y dependiente de empresas externas.

Además, el continuo desarrollo de las piezas hace que se requiera fabricar en reiteradas ocasiones, lo que provoca que el gasto económico por fabricación tenga un peso mayor.

- Fibra de carbono: Por propiedades del material, la fibra de carbono sería el material idóneo para realizar este proyecto: bajo peso, gran resistencia a impactos y resistencia al calor.

Si se compara con la madera de balsa, la densidad de la fibra de carbono es superior, sin embargo, la capacidad de resistencia a impactos y a las altas temperaturas se convierten en argumentos muy a favor de esta solución.



Ilustración 8: Fibra de carbono en McLaren P1

Las propiedades de la fibra de carbono hacen que ésta sea un material muy útil en aplicaciones que requieren un rendimiento mecánico óptimo, como lo son: la industria aeroespacial, automovilística, pasando por la fabricación de prótesis y otros productos de elevado rendimiento.

No obstante, el alto coste para el uso de este material y, como se comentó anteriormente, la necesidad de fabricar una misma pieza en reiteradas ocasiones hace que el uso de este recurso sea inviable.

Tras el análisis realizado, se decidió que el material más adecuado para la construcción fuese el plástico PLA, uno de los más comunes para la impresión 3D.

Programa de diseño CAD:

Los programas de diseño CAD (Diseño asistido por computador) permiten transformar las ideas y bocetos más simples en diseños que pueden ser llevados a la industria. Desde la década de los 80, estos programas se han ido perfeccionando para ser más potentes y más fáciles de operar por el usuario. A día de hoy, son decenas las diferentes opciones de diseño que se pueden encontrar.

Sin lugar a dudas, 3 de los software de diseño asistido por computador más potentes y utilizados son AutoCad (y sus variantes), CATIA y SolidWorks. Todos ellos poseen una interfaz de usuario muy depurada, debida al gran número de versiones que se han publicado. Sin embargo, existe una diferencia de peso entre dichos programas: la accesibilidad a una versión para estudiantes. A continuación se expone una tabla comparativa en la que se indican los precios de las versiones académicas de los 3 programas expuestos previamente:

Nombre del programa	Precio de la versión académica (€)
CATIA	99
SolidWorks	110
Autodesk Inventor (AutoCad)	Gratis

Tal y como se puede apreciar en la tabla anterior, se puede acceder a una licencia gratuita de Autodesk Inventor como alumno de la UPV, mientras que esto no es posible con CATIA o SolidWorks.

Motores y ESC:

Para el cálculo de los motores, se realizó una estimación de la masa final del motor basado en la masa de las partes impresas en 3D, los componentes electrónicos, los propios motores y la batería.

Componente	Cantidad (ud)	Peso (g)
Motores	2	35
Controladora	1	99,8
Placa de potencia	1	30
ESC	2	16
Batería	1	180
Chasis	1	120
Servos	2	43
	TOTAL	617,8

Al obtener un peso de entre 600 y 700 gramos, se optó por buscar motores que se utilizaran de forma común para aplicaciones como drones de carreras. Estos motores están equipados con hélices de diámetro pequeño y, normalmente, 3 palas y tienen un amplio rango de revoluciones.

Para asegurar el vuelo en caso de cambio de alguno de los componentes, se optó por escoger motores que pudieran alzar el doble del peso del dron. Ante esta situación, se valoraron 3 modelos diferentes, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Modelo	Peso (g)	Intensidad pico (A)	Vatios pico (W)	Empuje (G)	RPM max	Eficiencia (G/W)
TMotor F60 Pro 2350KV	35	40,35	617,76	1394,15	27.734	2,26
TMotor MN1806 KV2300	18	11,1	123,21	535	17.500	4,34
EMAX RS2205 2600KV	30	25	400	763	29.050	1,91

Un parámetro significativo del rendimiento de un motor es la eficiencia, que se representa en la anterior tabla como gramos/vatio. El motor con mayor propulsión por vatio es el T Motor MN1806, sin embargo las revoluciones por minuto máximas hacen que el empuje máximo de dicho propulsor sea de 535 gramos, un número que queda por debajo del límite marcado en 617 gramos (el peso del dron).



Ilustración 9: TMotor MN1806

Por otra parte, el TMotor F60 Pro posee el mayor empuje máximo de los 3 con 1394,15 gramos. A pesar de esto, el consumo energético de este propulsor es excesivo para la aplicación, de manera que se trata de un motor apto para objetos voladores de mayor peso, pero superior al necesario para el Dron Bimotor Tilt Rotor que se diseña.



Ilustración 10: TMotor F60

El motor EMAX RS2205 tiene un rendimiento ligeramente inferior al del TMotor F60, pero su empuje máximo es idóneo (763 gramos) y el rango de revoluciones por minuto es el más amplio. Por ello, esta es la solución escogida.

* * * *

Los variadores de velocidad reciben alimentación de la placa de potencia y gracias a los pulsos provenientes de la controladora de vuelo, emiten las señales por los 3 cables de salida que provocan el giro de los motores.

Para la elección de los variadores de velocidad, comúnmente llamados ESC, es necesario atender a 2 parámetros: la intensidad máxima de funcionamiento la clase de baterías a las que se puede conectar. De esta forma, la elección de los ESC será dependiente de la del motor y de la batería.



Ilustración 11: ESC Spedix 30A

Pese a que es aconsejable que la intensidad máxima de funcionamiento de los ESC sea superior a la intensidad máxima de los motores, es necesario remarcar que los ESC tienen un margen de entre 5 y 10 amperios por encima de la intensidad máxima de funcionamiento. Esto permite que puedan ser utilizados con motores cuya corriente pico está por encima de la marcada por los variadores.

La corriente máxima de funcionamiento de los motores es de 25, pero ésta se alcanza raramente, ya que la intensidad para mantener el dron en equilibrio se da cuando la suma del empuje de ambos motores es igual al peso del dron. Esta intensidad “de equilibrio” es de 10 amperios, de forma que la elección de unos ESC de 20A se convierte en una solución robusta para la aplicación.

Por otro lado, dado que se pretende utilizar una batería de 3S, es necesario que los ESC que se escojan puedan ser alimentados con baterías de tal voltaje.

No existen diferencias de funcionamiento entre los variadores de velocidad de una u otra marca, de forma que el criterio seguido para la selección fue el tamaño y el peso. En estos dos parámetros, los ESC más adecuados son los EMAX de 20 amperios y preparados para ser alimentados por baterías de entre 2S y 4S.

Baterías:

Sin lugar a dudas, el componente más difícil de escoger fue la batería, ya que había que tener en cuenta tanto la capacidad de entrega de potencia como la autonomía, ya que parar de hacer pruebas cada pocos minutos por falta de energía sería una enorme limitación.

Sin embargo, entre limitar el rango de potencia de los motores y limitar la autonomía, se optó por reducir esto segundo, ya que durante las pruebas el dron estaría anclado a la plataforma de test y una pérdida de energía no supondría ningún daño, sino simplemente unos minutos de pausa para recargarla.

Ante esta situación, se escogió una batería de 1500mAh que con un peso de 180 gramos y su tamaño reducido era fácil de incluir en el conjunto del dron. Además, dicha batería tiene una intensidad pico de 130 amperios, lo que aseguraba cubrir la demanda energética de los motores, ya que la intensidad pico de éstos nunca sería superior a 50 A. Si apreciamos el funcionamiento estacionario de la batería, la intensidad máxima que proporciona es de 65 A y la máxima demanda de cada motor es de 25, por lo que también se tiene un margen de seguridad en este ámbito.

Modelo de controladora de vuelo:

Existe un gran número de controladoras de vuelo que pueden ser programadas para realizar la función de estabilización en diferentes tipos de aparatos como aviones, helicópteros, diferentes clases de drones, etc. Los siguientes 3 modelos son los que más se adaptan a las nuestras características: CC3D, PX4 y Beagle Bone Blue, pero existen grandes diferentes que son expuestas en la siguiente tabla:

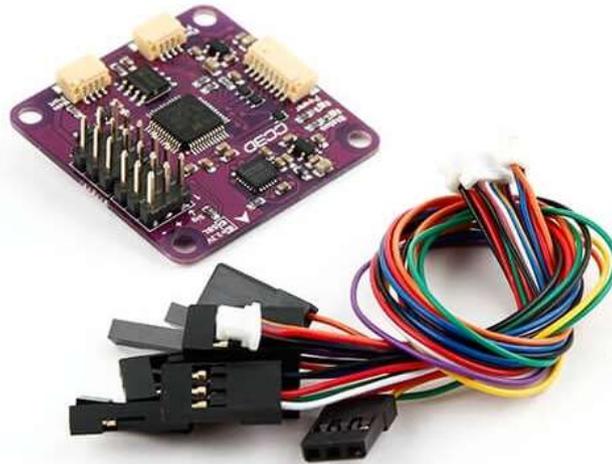


Ilustración 12: Microcontroladora CC3D

La OpenPilot CC3D que se muestra en la imagen anterior es una microcontroladora de reducido tamaño y muy versátil debido al gran rango de aparatos voladores en los que se puede utilizar. Además, la CC3D viene dotada de una estación de control de tierra OpenPilot GCS, lo que evita tener que comprar placas o chips adicionales para la programación.

Todas sus funcionalidades se pueden controlar desde su propio software. La CC3D tiene la opción de equipar un GPS que permite las funciones de piloto automático para seguimiento de puntos de interés. El precio de esta placa es de 40€.

Estas son las características más destacables:

- Potente microcontrolador STM32 de 32 bits funcionando a 90MIPs con 128KB Flash y 20 KB de RAM
- Giróscopo y acelerómetro MEMs, ambos de alto rendimiento sobre los tres ejes.
- Pequeña PCB de 4 capas de 36mmx36mm que reduce el ruido eléctrico superior y mejora el rendimiento de vuelo.



Ilustración 13: Microcontroladora PX4

La microcontroladora de vuelo Pixhawk PX4 ofrece unos servicios muy similares a los de la OpenPilot CC3D. Esta controladora está preparada para ser monitorizada desde la estación de tierra QGround Control y puede aplicarse a diferentes objetos voladores como aviones, helicópteros y drones. La Pixhawk también posee la opción de equipar un GPS que permite las funciones de piloto automático para seguimiento de puntos de interés. El precio de esta placa es de alrededor de 150€.

Los datos del procesador son:

- STM32F427 with 168 MHz ARM Cortex-M4F core[4]
- 256 KB RAM
- 2 MB Flash
- 32 bit STM32F103 fail-safe co-processor

Y los de los sensores:

- MPU6000 como acelerómetro y giróscopo principal
- ST Micro 16-bit giróscopo
- ST Micro 14-bit acelerómetro/magnetómetro
- MEAS barómetro

Sin embargo, ambas 2 placas poseen un problema y es que se trata de microcontroladores. Estos circuitos están expresamente diseñados para cumplir una función en particular, lo que aminora su robustez y capacidad para adaptarse a nuevas aplicaciones. Por ello, era necesario un microprocesador, lo que aportaba mayor velocidad de cálculo y memoria.

Además, es necesario que el microcontrolador escogido tenga un tamaño reducido y que disponga de salidas PWM para alimentar a los servos e indicar el régimen de giro a los variadores de velocidad. También se requiere que la placa permita la conexión de un receptor que aporte las referencias determinadas desde la emisora. Al buscar estas características se opta por la Beagle Bone Blue, que con un coste de 80€ permite todas estas funcionalidades.

Protección:

Hallar un correcto sistema de protección para el dron fue una de las mayores preocupaciones durante la fase inicial del proyecto. Dado que se trata de un dron innovador, no existen estructuras de protección como si las hay para cuadricópteros más pequeños u otros tipos de aeronave.

Además, la alta probabilidad de accidente durante la fase de test podría poner en riesgo la integridad de unos materiales cuyo coste es muy elevado y las horas empleadas en su configuración todavía más. De esta forma, disponer de un sistema de protección se convierte en una condición sin la cual no se podrá poner a volar el dron, al menos en su fase inicial.

La opción de construir una jaula tiene como ventaja que es la solución definitiva al problema de la protección, ya que no es necesario ningún otro tipo de estructura para proteger el dron. Además, el uso de una jaula permitiría prescindir de la bancada de test, lo que significaría un ahorro económico.

Dadas las consideraciones anteriormente expuestas, únicamente quedaban como incógnita el material de construcción de la jaula y la geometría de la misma. La imposibilidad para acceder varillas de polímero, provocó que se valorara como opción más idónea que la jaula estuviese realizada con alambre galvanizado. Este material cumplía con los requisitos de protección establecidos (que no se dañaran ni el chasis ni la electrónica), pero el peso se convirtió en un gran inconveniente.



Ilustración 14: Alambre para jaula

El peso de cada metro de alambre de 4mm de diámetro es de 6,57 gramos. Para la protección del dron eran necesarios un mínimo de 14 metros, de forma que el peso añadido al dron sería cercano a los 100 gramos, un 15% del peso del dron.

Este condicionante hizo inviable la implantación de una jaula como sistema de protección, por lo que se optó por utilizar la bancada de test para las pruebas y usar unas ruedas de protección para una futura fase de vuelo.

A continuación se muestran 2 ejemplos de jaula que fueron estudiados para nuestra aplicación, pero que finalmente no fueron utilizados:



Ilustración 15: Jaula para cuadricóptero

Finalmente, la necesidad de reducir peso y facilitar un despegue y aterrizaje seguro nos llevó a una solución más práctica como lo son las ruedas de protección.

6. Solución adoptada

6.1. Frame

En el siguiente bloque se expone de manera detallada el proceso de diseño del dron.

6.1.1 Diseño

Tras descartar algunas versiones por motivos de robustez mecánica o dificultad para la impresión, se realizó un primer diseño que se evolucionó para cumplir con las necesidades del proyecto.

Con el objetivo de evitar voladizos, el chasis del dron se diseñó en 2 mitades que unidas por 5 varillas roscadas de 3mm de diámetro constituirán el cuerpo principal del aparato. Cada mitad del chasis posee unas dimensiones de 98mm de alto, 47,5mm de ancho y 20mm de profundidad.

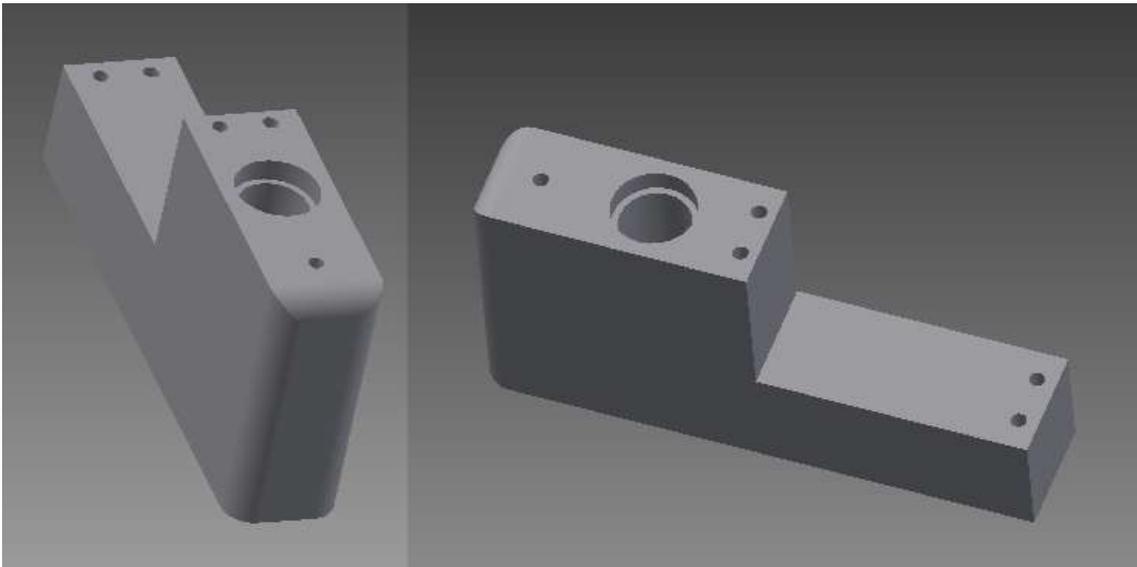


Ilustración 16: Medio chasis

Tal y como se puede apreciar en la anterior imagen, el chasis posee 6 orificios pasantes: 5 para varillas roscadas de 3 mm de diámetro que sirven de unión y 1 orificio que, con la ayuda de 2 rodamientos, sirve de eje de rotación para el control del cabeceo cuando el dron está sujeto a la bancada de test.

Además, el chasis alojará 2 servos que serán sujetos con 4 varillas pasantes. Estos servos se unen a los soportes de los motores para establecer un determinado ángulo de giro al eje de los propulsores. El resto de superficie del chasis servirá para alojar toda la electrónica.

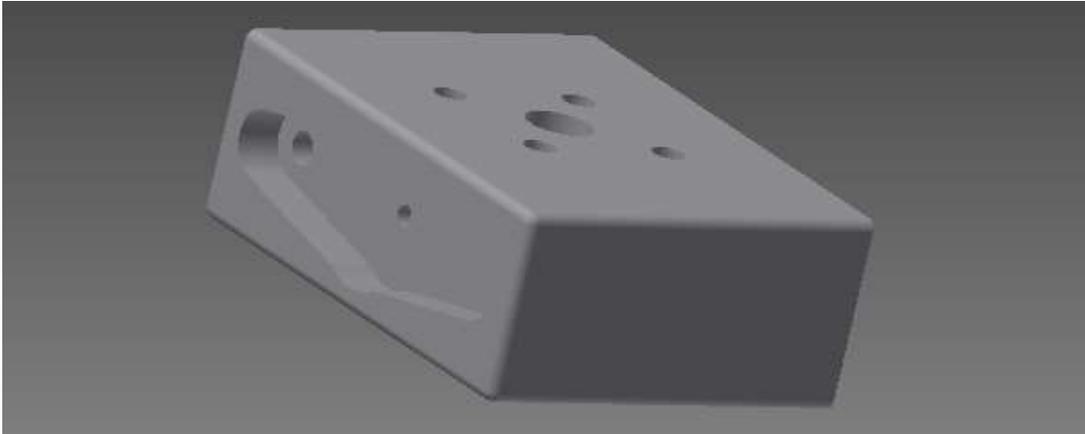


Ilustración 17: Soporte de los motores

Los soportes de los motores son la pieza con mayor complejidad de diseño, dado que se busca que el peso sea mínimo y la integración en el conjunto servo-motor sea total para evitar vibraciones durante la fase de test que puedan complicar el control.

Dichos soportes están preparados para que el accesorio para los servos encaje en el cuerpo de la pieza. De esta forma, se consigue transmitir el movimiento del servo sin holguras, para evitar cualquier tipo de traqueteo.

Durante el montaje del dron se observó cómo las vibraciones producidas por el funcionamiento de los motores podrían hacer flexionar el ensamblaje entre el servo y la plataforma de sujeción de los motores, lo que cambiaría el efecto de dichos actuadores y, por tanto, la dinámica de movimiento del dron se dejaría de ceñir al modelo inicial.

Debido a esto, se realizó un estudio de necesidades del soporte de sujeción de los motores y se inició un proceso de evolución de la pieza. El resultado que se muestra en este apartado es la consecuencia de 3 evoluciones desde un diseño inicial.

Para alojar el motor, se han realizado 5 agujeros: 4 de ellos pasantes para los tornillos de métrica 3 que fijan el motor y una hendidura para albergar el eje del motor.

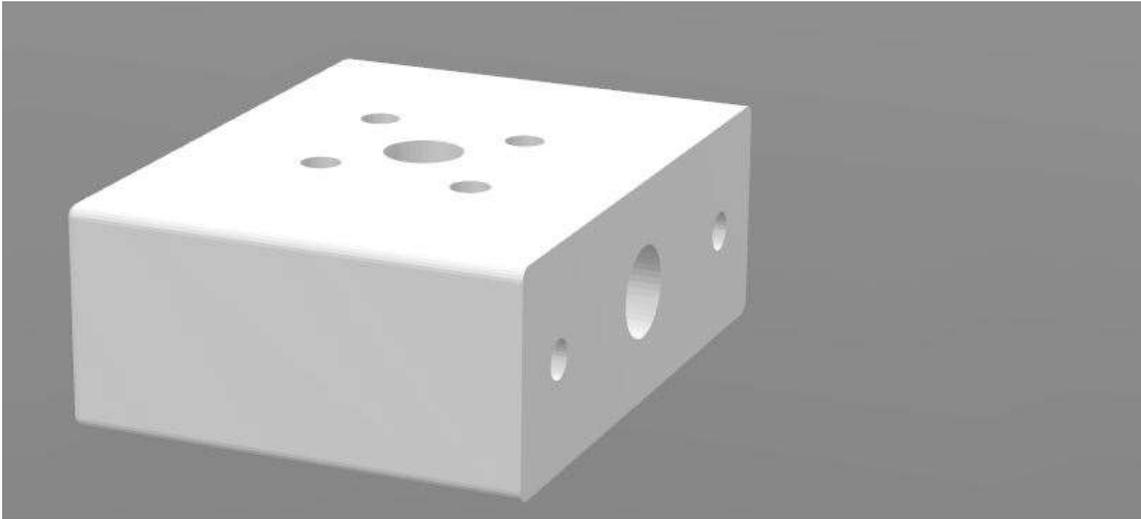


Ilustración 18: Soporte del motor

En la imagen superior se puede apreciar una vista diferente del soporte de los motores. En la cara derecha hay un orificio de 22mm de calado que permite el paso de la cabeza del tornillo que da mayor robustez a la unión con el servo. Además de ello, los 2 orificios laterales pasantes, reducen el peso de la pieza y permiten una mayor acción de la resina epoxy que fijará el soporte al accesorio de los servos.

Por último, las ruedas de protección tienen un diseño que busca amortiguar los impactos y proteger la electrónica. Las ruedas de protección son, como se expone previamente en este documento, el sistema de blindaje del Dron Bimotor Tilt Rotor. Su aspecto es el siguiente:

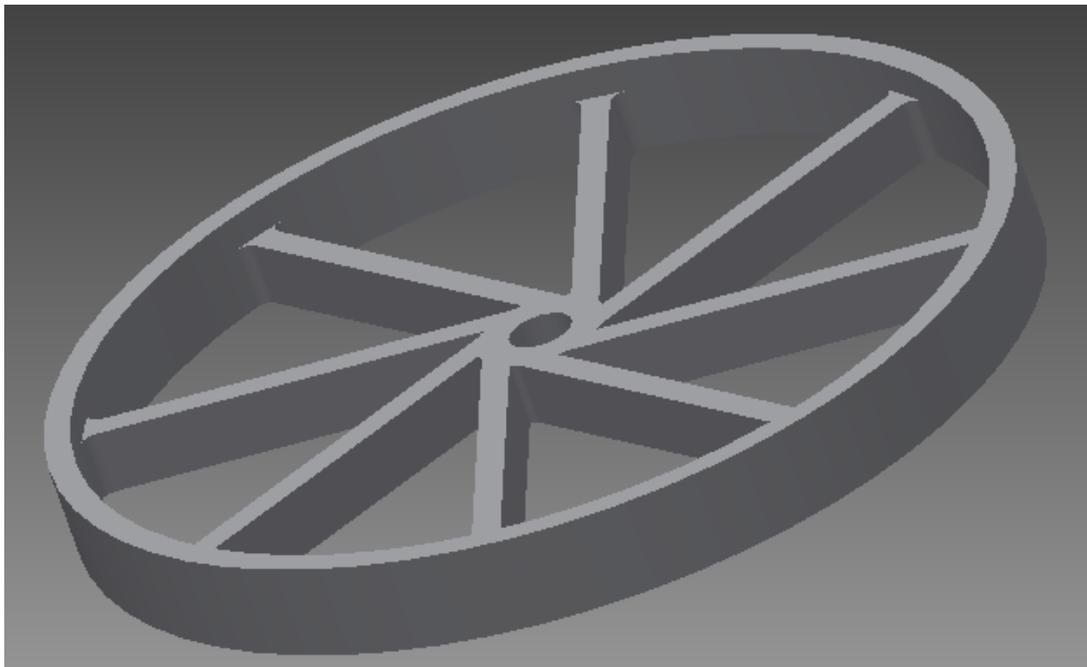


Ilustración 19: Rueda de protección

Aparte del cometido para la fase de test, la varilla pasante de fibra de carbono servirá como unión entre el chasis y las ruedas de protección, de forma que éste se convierte en un diseño modular, válido para los test y válido para los futuros vuelos.

La forma más correcta de segmentar la estructura diseñada sería: chasis (color blanco en la imagen inferior), soportes para los motores (color rojo), varilla (color gris) y ruedas de protección (color azul). En la siguiente imagen se puede apreciar un ensamblaje de Autodesk Inventor Profesional 2015 en el que se muestra el diseño del dron.

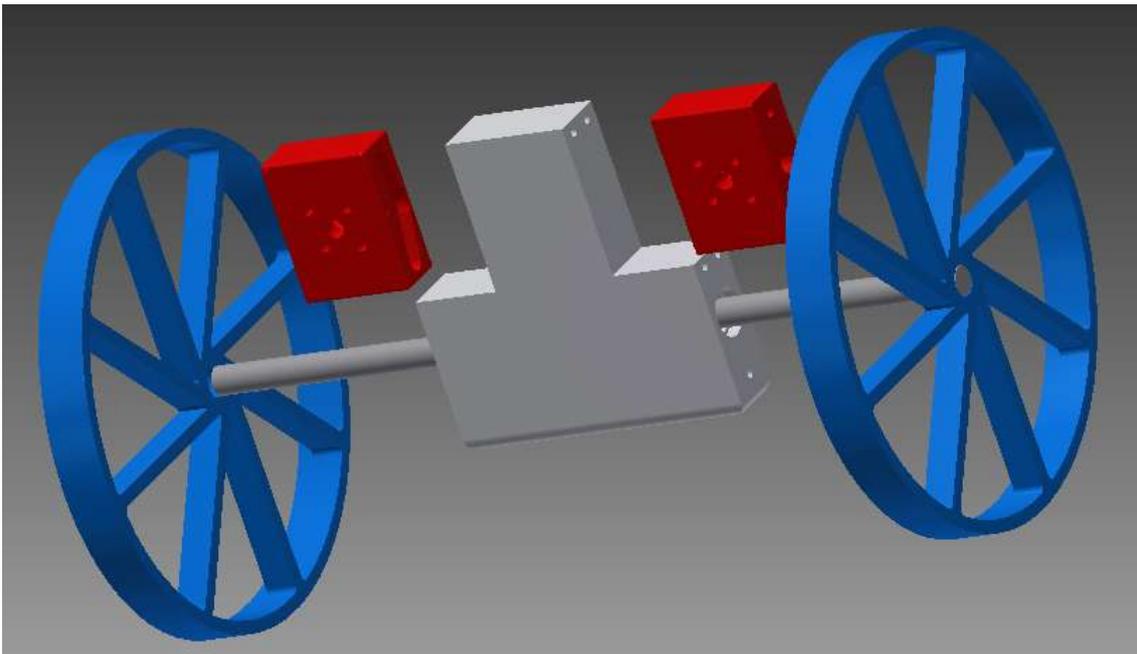


Ilustración 20: Ensamblaje del dron

De esta forma se elaboró el diseño de las distintas piezas que componen el dron como conjunto. A continuación se expone el proceso de fabricación de las piezas.

6.1.2. Fabricación: Impresión 3D

En el presente apartado de esta memoria se explica de forma detallada el proceso de construcción del dron, formado por: impresión en 3D, ensamblaje de las diferentes partes, alojamiento y conexión de los componentes electrónicos.

La impresión 3D fue la primera etapa de la fabricación del dron. La impresión de cada una de las piezas se realizó en la impresora CubePro Duo propiedad del instituto ai2, aunque antes de la impresión se llevaron a cabo diversas simulaciones con los programas de diseño y visualización 3D Autodesk Inventor Profesional y 3D Builder.

Las impresoras 3D siguen un trazado punto a punto en el que gracias a la temperatura del extrusor y de la cama se consigue la formación de un cuerpo uniforme. La forma de impresión es de abajo (parte más cercana a la cama) hacia arriba, de forma que es importante evitar en medida de lo posible estructuras voladizas, es decir, aquellas que no tienen un apoyo en su parte inferior.

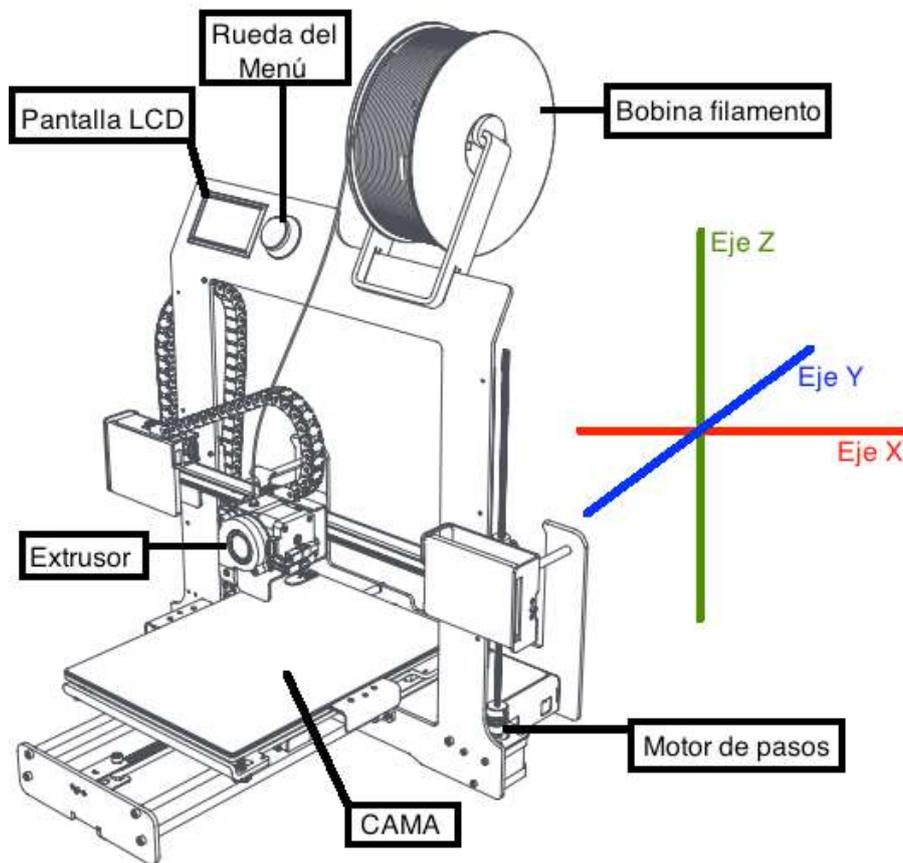


Ilustración 21: Partes de una impresora 3D

Con el objetivo de evitar deformaciones en la impresión, se evitó cualquier tipo de parte voladiza en 2 de las 3 piezas a fabricar. Así, el chasis fue impreso en 2 mitades que posteriormente serían unidas mediante varillas roscadas que también fijarían los servos al chasis. Las ruedas de protección y los soportes de los motores sí fueron impresos de una sola pieza, dado que lo permitían sus geometrías y tamaños. Es necesario recalcar que la impresora 3D utilizada, una Cube Pro Duo, es una impresora de gran resolución, que respeta enormemente los diseños con una resolución de 75 micrómetros.

En primer lugar, con la ayuda de Autodesk Inventor Profesional se realizó un ensamblaje y se comprobó que todos los componentes electrónicos tenían cabida en la superficie exterior del chasis. Además, se probó que las hélices no hicieran contacto y se dejó una distancia de seguridad para tener un margen en caso de cambiar la longitud de las aspas.

Una vez comprobado que el diseño realizado se podía imprimir y sería una buena base para el proyecto, se generaron archivos 3D con extensión “.stl”, que posteriormente fueron convertidos a un trazado punto a punto que es leído por la impresora.

Tras la impresión, estos son los resultados:

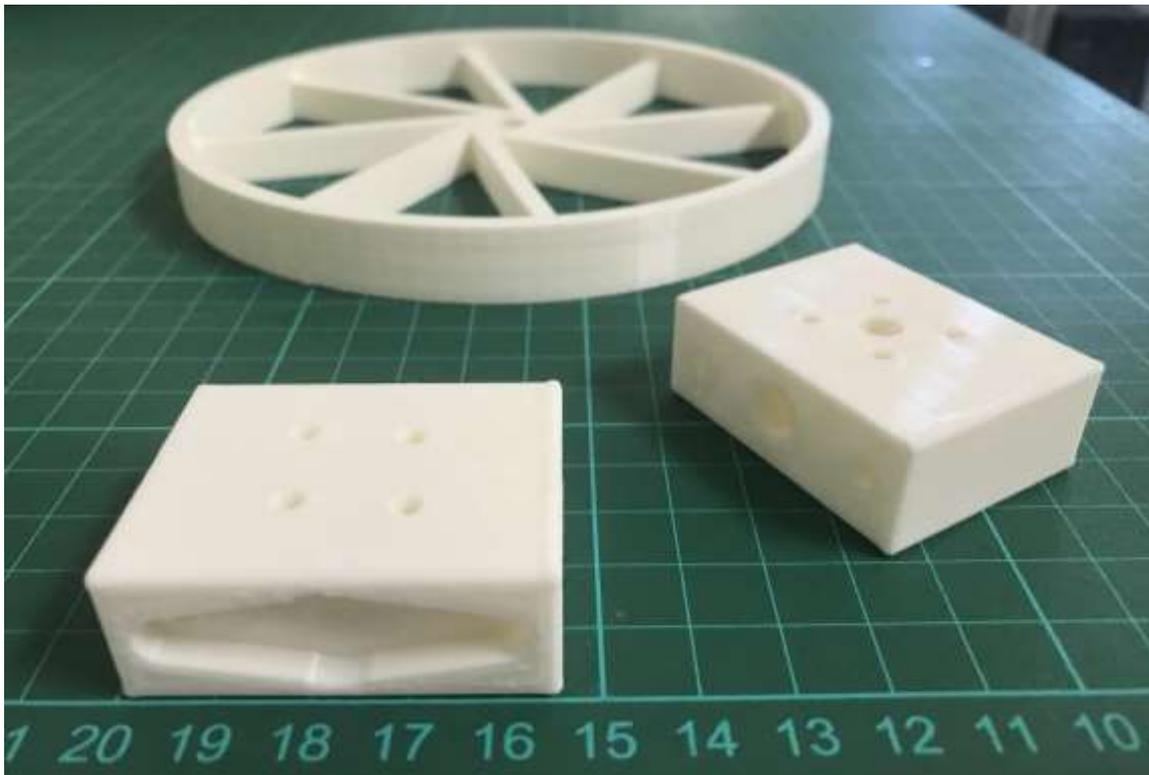


Ilustración 22: Rueda y soportes de motor impresos

6.1.3. Ensamblaje del dron

Tras la impresión de las piezas, comenzó el proceso de ensamblaje del dron e instalación de todos los componentes electrónicos. Tal y como se detalla en el presente apartado, en primer lugar se ensamblaron todas las partes mecánicas del dron y posteriormente se situó toda la electrónica.

Debido a las características del PLA, plástico utilizado para fabricar las piezas, se añadió una condición extra al diseño de las piezas que afectó enormemente en el montaje. El PLA es un material muy rígido y ligero que es resistente a compresiones. Dado que se trataba de un diseño modular, se optó por realizar todos los orificios o hendiduras de las piezas 1mm más pequeños de lo necesario, con el objetivo de que a la hora de acoplar las distintas partes, se diera un encaje a presión y no hubiera posibilidad de desmontaje.

Esta decisión fue muy positiva para el acople de los accesorios de los servos a los soportes de los motores, donde se consiguió un conjunto tan rígido como se requería.

Dicho esto, la primera acción de ensamblaje fue unir las dos mitades del chasis y con ellas, los servos que posteriormente harán girar los soportes de los motores. Tal y como se puede apreciar en la imagen inferior, 5 varillas roscadas de 3mm de diámetro son las utilizadas para unir las partes.



Ilustración 23: Chasis unido con servos

Con el chasis unido y los 2 servos integrados, se realizó la comprobación de acoplar los servos y pasar la varilla de fibra de carbono. Se debe recordar que esta varilla de fibra de carbono hará que las ruedas de protección roten libremente, lo que también ayudará al despegue.

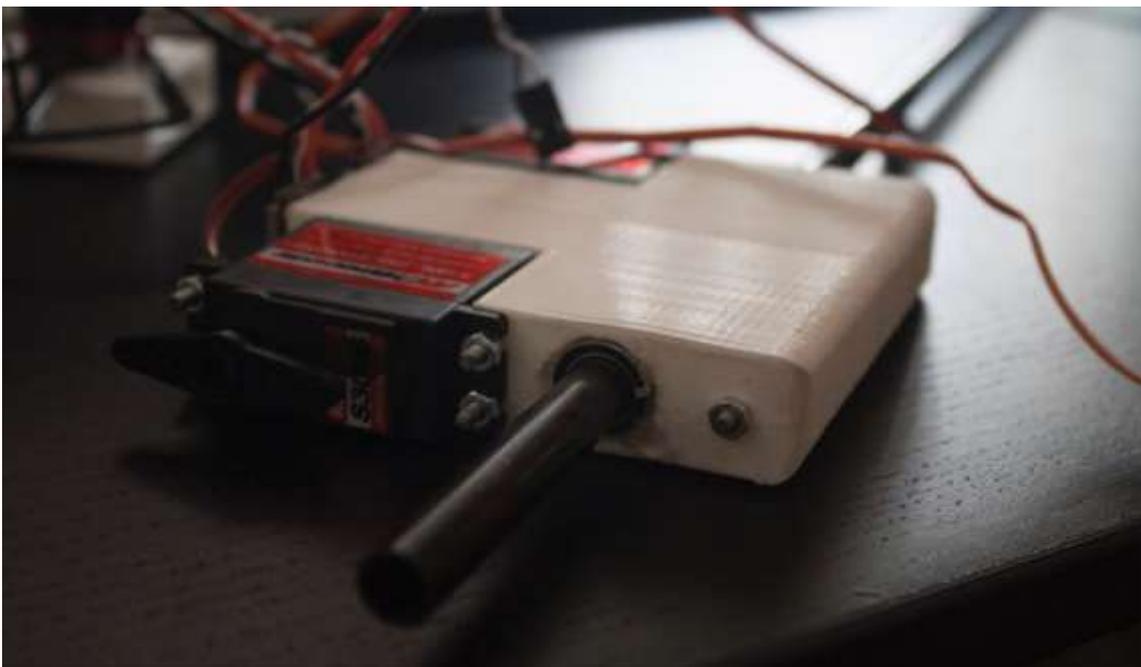


Ilustración 24: Barra de fibra de carbono

En realidad, el control sobre la estabilidad del dron se realizara con el aparato sujeto a la plataforma de test, de forma que el montaje que se presenta en la anterior imagen es una mera comprobación.

Siguiendo con el montaje del dron, previo a la colocación de la controladora de potencia de los motores y la controladora de vuelo, se probó cual sería la correcta posición y orientación de los motores y los variadores de velocidad. En la imagen inferior se puede apreciar cómo las 3 conexiones de ambos propulsores están dispuestas hacia arriba, ya que esta es la posición que mayor ángulo de utilización da a los servos sin que las hélices impacten con ninguna parte de la electrónica.

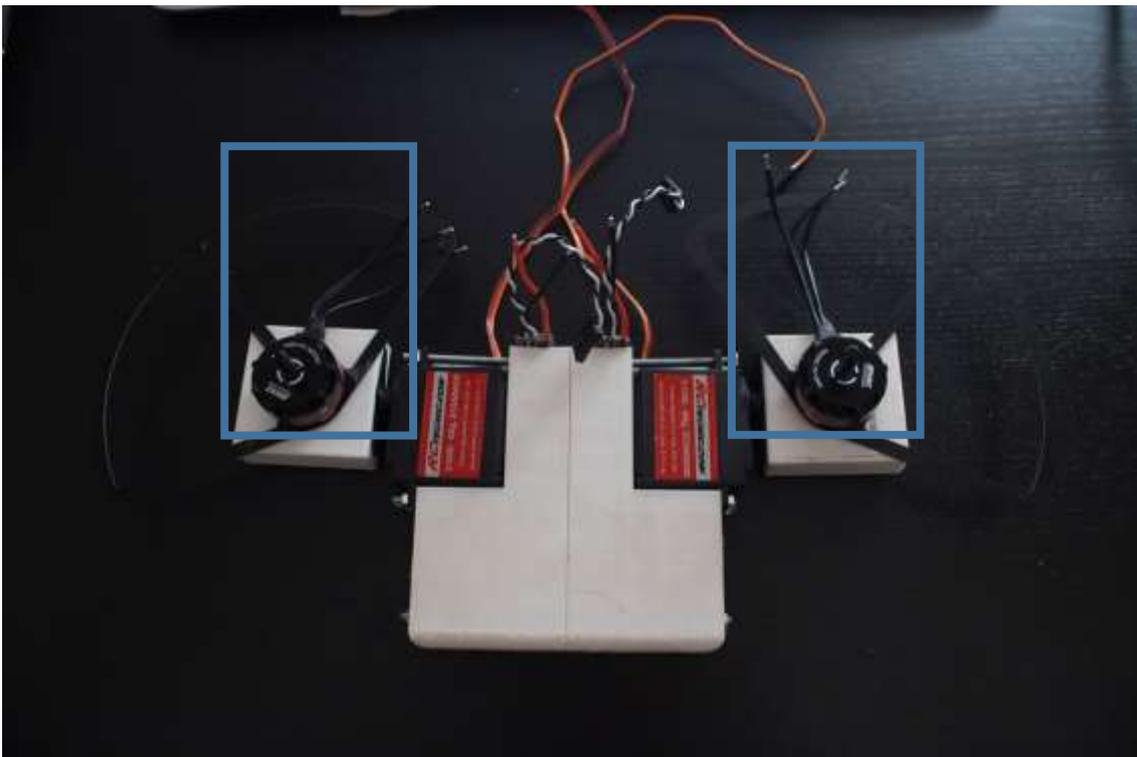


Ilustración 25: Dron con motores

A continuación, los motores se fijaron a las plataformas de sujeción incluyendo un protector para las hélices, unos cojinetes en la parte inferior para evitar vibraciones y uniendo los acoples de los servos a los soportes mediante pegamento Epoxy. Este es el resultado del conjunto:

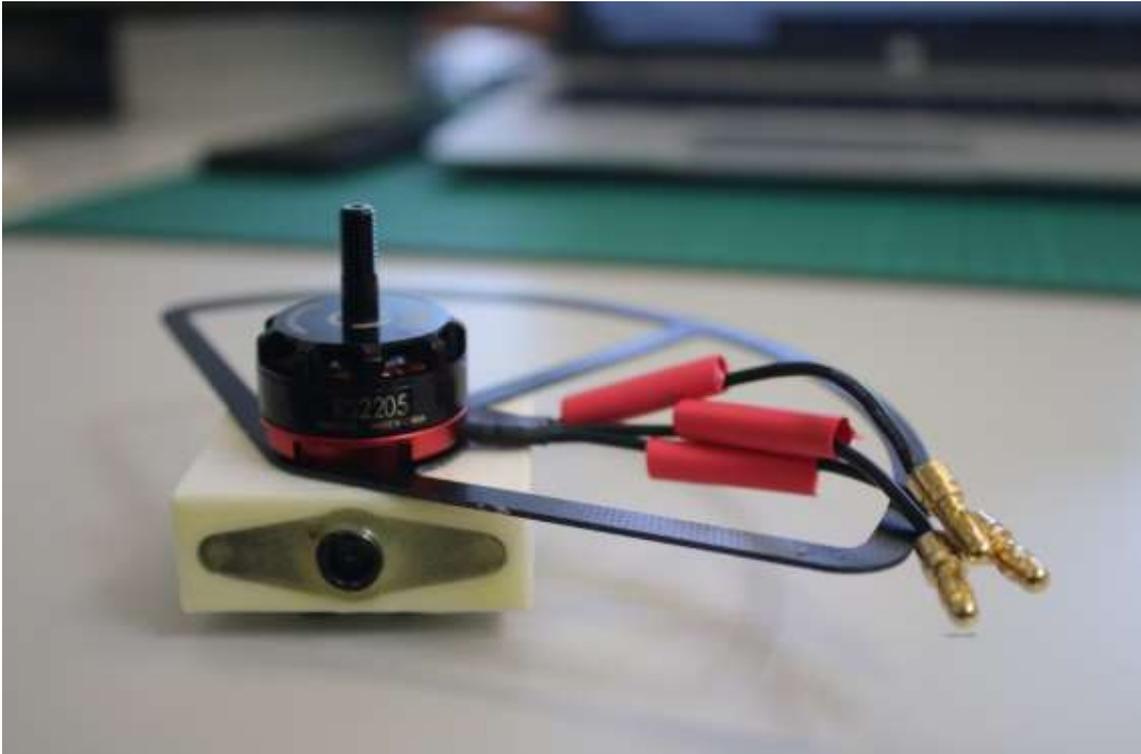


Ilustración 26: Soporte con motor anclado 1

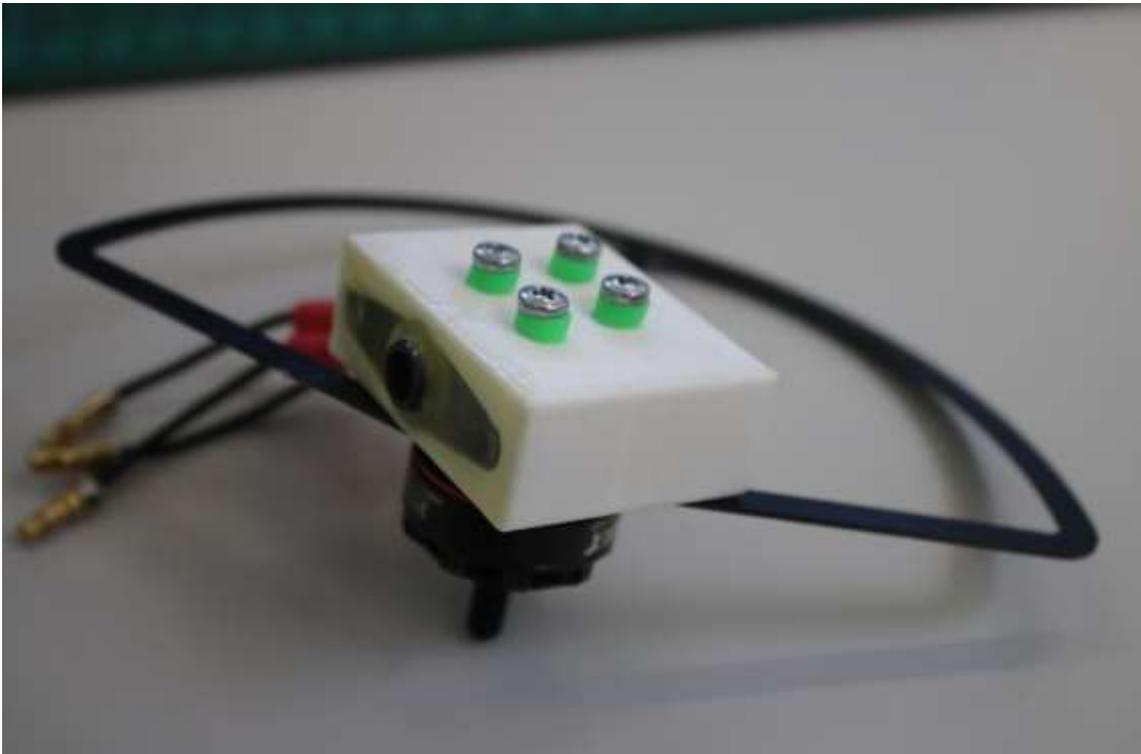


Ilustración 27: Soporte con motor anclado 2

Con los motores ya incluidos en el conjunto, el paso restante es sumar todos los dispositivos electrónicos y la batería. No obstante, antes de presentar el montaje de la electrónica en el punto 6.10 de esta memoria, se expondrán los componentes electrónicos elegidos.

6.2. Plataforma de pruebas

En el apartado siguiente se describe en profundidad el motivo de la construcción de la plataforma.

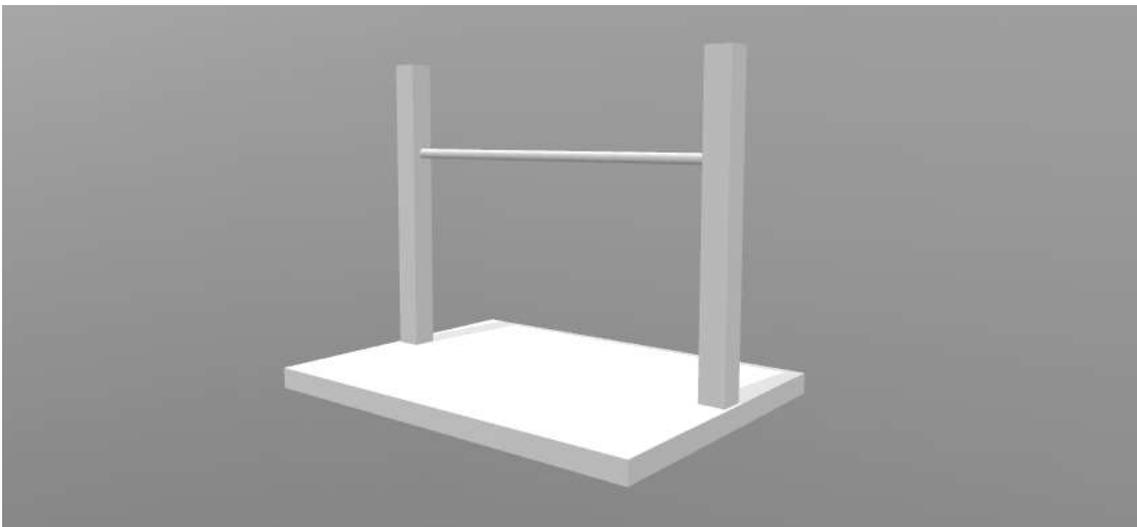


Ilustración 28: Diseño de la plataforma de test

Debido a la dimensión del proyecto y a las dificultades para estabilizar el aparato, desde la concepción inicial del trabajo se decidió construir una plataforma para las pruebas. Esta plataforma permitiría realizar prueba, lo que evitaría posibles accidentes que ocasionarían daños físicos y/o materiales.

Disponer de una plataforma para pruebas permitió seleccionar una batería de menor capacidad y por lo tanto menor peso que se pudo integrar en el conjunto de una forma más sencilla. Además, la plataforma facilitó el traslado del dron del laboratorio del DISA a otros talleres.

El diseño de esta plataforma fue más sencillo que el del dron, ya que únicamente se trataba de fijar el dron con un grado de libertad rotacional. Para asegurar la compatibilidad de la plataforma y el dron, se realizó un diseño CAD previo con el objetivo de asegurar de que el ancho de la plataforma fuera suficiente para albergar el dron e incluso permitiera un margen de maniobra para modificaciones en el diseño u otras disquisiciones.

La construcción de la plataforma de test se realizó a partir de una tabla de aglomerado y dos columnas prismáticas de aluminio. Tiene las siguientes características:

- Peso: 2 kg.
- Dimensiones: 600mm de largo x 300mm de ancho x 20mm de alto.

El resultado es el siguiente:



Ilustración 29: Plataforma de test fabricada y montada

6.3. Motores



Ilustración 30: Motor

Los motores utilizados para propulsar el aparato son unos “Emax RS2205 Racer”, unos propulsores sin escobillas de alto rendimiento que son utilizados en drones de carreras. Para la aplicación, los datos más relevantes que provocaron que los escogieramos es que pesan únicamente 30 gramos y logran levantar más de un 1kg de peso, lo que unido a su reducido tamaño deja ver que son motores muy eficientes.

Especificaciones:

- Modelo: RS2205 2600KV
- KV: 2600kv
- Peso: Aprox. 30g con los alambres
- AWG: 20AWG
- Estator Diámetro: 22 mm
- Estator Altura: 5mm
- Diámetro del eje: 3 mm
- Configuración: 12N14P
- Diámetro del motor: 27.9mm
- Altura del motor: 31,7 mm
- Adaptador hélice de eje de rosca: M5
- Voltaje de entrada: 3S-4S (12.6 - 16,8V)
- Máximo empuje con hélice 4x4.5 763g

El funcionamiento de un motor sin escobillas como el que se utiliza es consecuencia del campo magnético generado por las 3 fases que lo alimentan de forma secuencial. En la imagen inferior se muestra un ejemplo de excitación de un motor eléctrico.

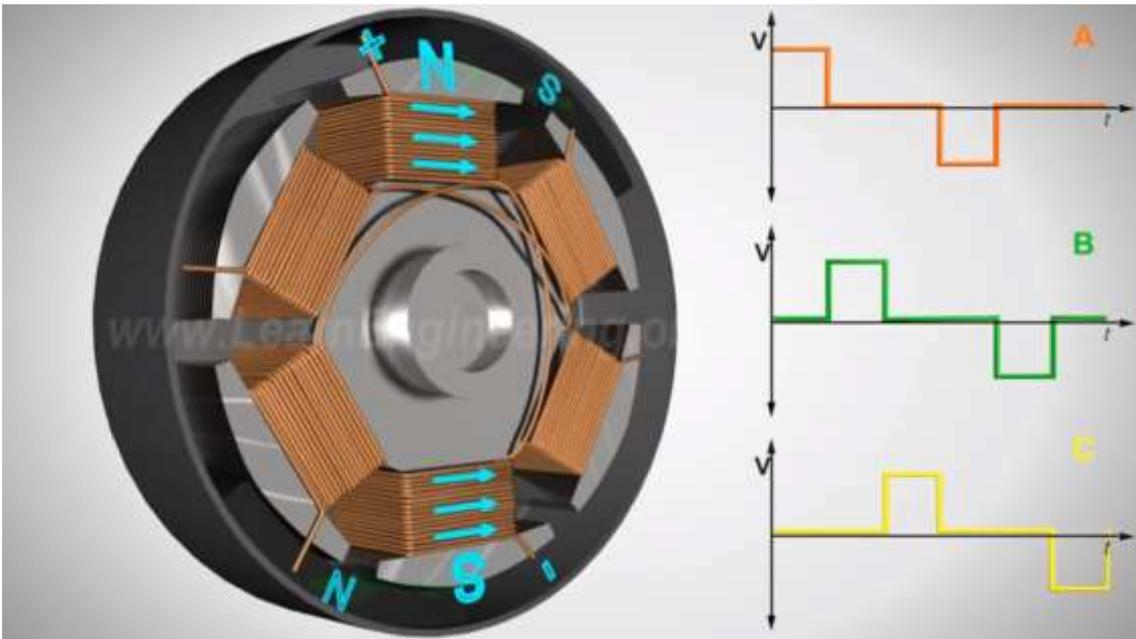


Ilustración 31: Excitación de un motor brushless

La eficiencia del motor en empuje/potencia se reduce a medida que aumentan las revoluciones por minuto. Con unas hélices 5x4x3 como las que se presentan en el siguiente apartado, estos son los valores de funcionamiento del motor.

Motor type	The voltage (V)	Paddle size	current (A)	thrust (G)	power (W)	efficiency (GW)	speed (RPM)
RS2205 -2600KV	12	HQ4045 BN	1	55	12.00	4.58	8030
			3	131	36.00	3.64	12350
			5	196	60.00	3.27	14910
			7	256	84.00	3.05	16940
			9.1	308	109.20	2.82	18700
			11	362	132.00	2.74	20200
			13.1	420	157.20	2.67	21570
			15.1	461	181.20	2.54	22770
			17.2	510	206.40	2.47	23170
	19.5	567	234.00	2.42	24820		
	16	HQ4045 BN	1	65	16.00	4.06	8980
			3	153	48.00	3.19	13380
			5	232	80.00	2.90	16240
			7	293	112.00	2.62	18130
			9	352	144.00	2.44	19930
			11	420	176.00	2.39	21410
			13.1	466	209.60	2.22	22900
			15.2	521	243.20	2.14	24190
			17.1	574	273.60	2.10	25340
			19.1	620	305.60	2.03	26390
			21	670	336.00	1.99	27260
			23.1	732	369.60	1.98	28100
			25	763	400.00	1.91	29050

Ilustración 32: Tabla de funcionamiento del EMAX RS2205

Gracias a la anterior tabla se pueden apreciar los valores de funcionamiento para distintos rangos de revoluciones. Teniendo en cuenta que el peso del dron es de alrededor de 620 gramos, cada motor tiene que realizar un empuje de 310 gramos para mantener el aparato en equilibrio.

6.4. Hélices



Ilustración 33: Hélices

La elección de las hélices se realizó en conjunto con los motores. Los requisitos de las hélices son 2: tener el suficiente diámetro y paso para maximizar el rendimiento de los motores y no exceder de unas medidas en las que las turbulencias provocada por una hélice provocarían un efecto nocivo sobre el funcionamiento de la otra y viceversa.

Por ello, el modelo escogido son unas hélices tripala de 5x4, cuyo peso es inferior a 4 gramos. Estas hélices son comúnmente utilizadas en drones de carreras, como otros muchos elementos del dron bimotor tilt rotor que se construye en el proyecto.

Tal y como se puede observar en el siguiente gráfico, las hélices 5x4x3 escogidas tienen un rendimiento óptimo para 1500-1600 KV, de forma que para los 14,8 voltios de alimentación que aporta la batería, se intentará realizar las pruebas a alrededor de 20.000 revoluciones por minuto, tal y como muestra la siguiente fórmula:

$$rpm \text{ óptimas} = KV \text{ óptimo} \cdot Voltaje = 1500 \cdot 14,8 = 22.200 rpm$$

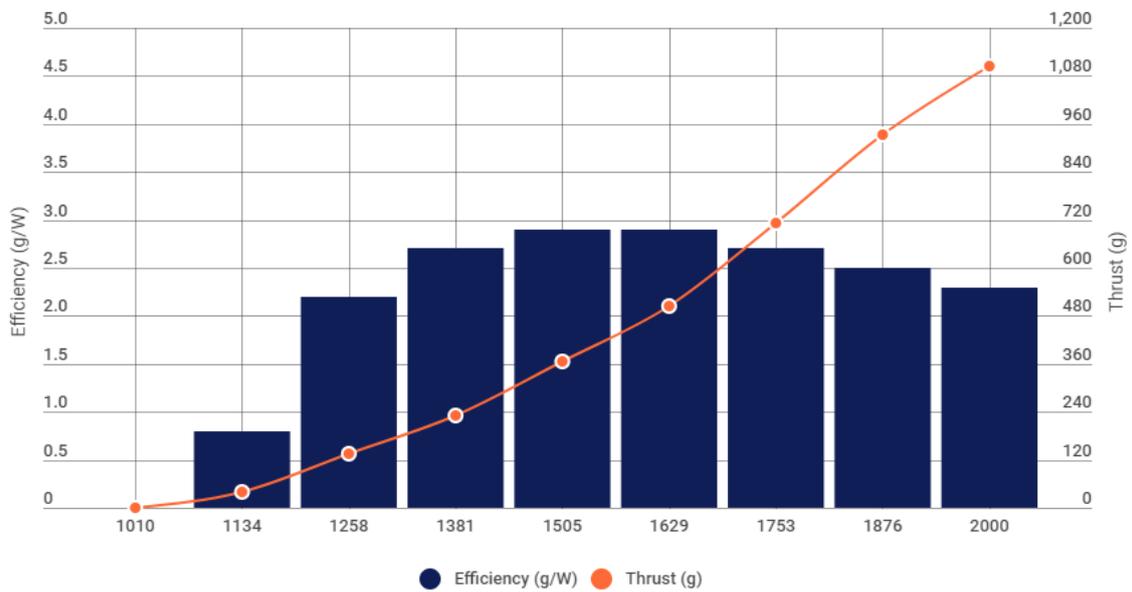


Ilustración 34: Rendimiento de las hélices

6.5. Batería



Ilustración 35: Batería

Tal y como se razonó en el apartado de soluciones alternativas, para alimentar el dron bimotor tilt rotor era necesario disponer de una fuente de energía con capacidad para responder a la demanda de los 2 motores y los 2 servos, pero también era necesario que esta fuente de energía tuviera un tamaño y un peso acorde al aparato diseñado.

La batería de polímero de litio escogida tiene un voltaje de 14,8 V departido en 4 celdas y su capacidad de entrega de energía es de 1500 mAh. Puede aportar de manera continua 65 amperios y aguanta picos de intensidad de hasta 130 amperios.

Especificaciones:

Capacidad: **1500mAh**

Voltaje: **4S – 4 celdas - 14.8V**

Descarga: **65C / 130C constante ráfaga**

Peso: **190 (incluyendo cable, el enchufe y el caso)**

Dimensiones: **91x33x28 mm**

6.6. Variadores de velocidad: ESC

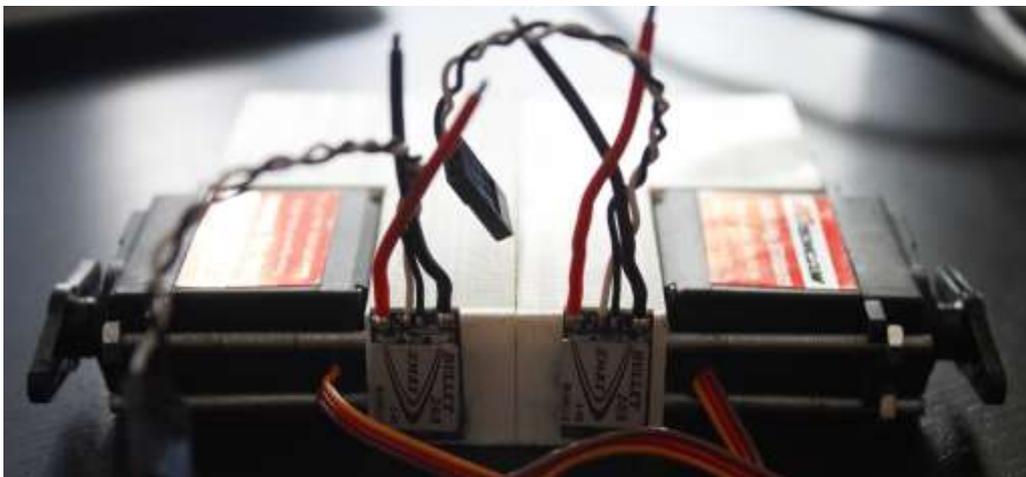


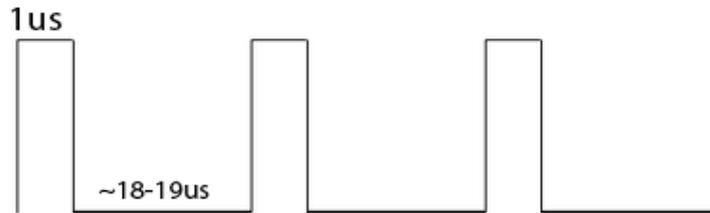
Ilustración 36: Variadores de velocidad

Los ESC (Electronic Speed Controller) son unos dispositivos esenciales en el funcionamiento de aparatos que utilizan motores sin escobillas brushless. Los variadores de velocidad reciben la información desde la controladora y regulan los pulsos de forma adecuada para que los motores giren a la velocidad deseada.

Existen diversos tipos de ESC según la intensidad pico de trabajo, de si disponen o no de BEC y del voltaje que pueden soportar. En nuestro caso, los ESC escogidos tienen una intensidad pico de 20 amperios y están preparados para ser alimentados con baterías de entre 2S y 4S. El funcionamiento de este elemento es el siguiente:

Los variadores de velocidad son controladores de modulación por ancho de pulsos. Son alimentados por la placa de potencia que regula la tensión de la batería y reciben una señal PWM proveniente de la controladora de vuelo con variaciones de 1 a 2 milisegundos.

No Throttle



Full Throttle

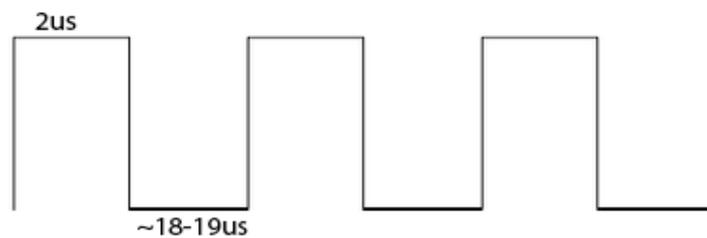


Ilustración 37: Modulación PWM Motores - Copyright Owenson.me

Cuando el periodo de la señal de entrada es de 1ms, el motor se mantiene parado; cuando el periodo es de 1,5 ms, el motor funciona a la mitad de su máximo régimen de revoluciones; cuando el periodo sea de 2ms, el motor funcionará a máxima potencia.

6.7. Placa de potencia

El regulador de voltaje de los motores es alimentado por la batería y se ocupa de proveer de potencia a los variadores de velocidad que están conectados a los motores. Dicho circuito integrado posee conexión con el receptor y los variadores de velocidad.

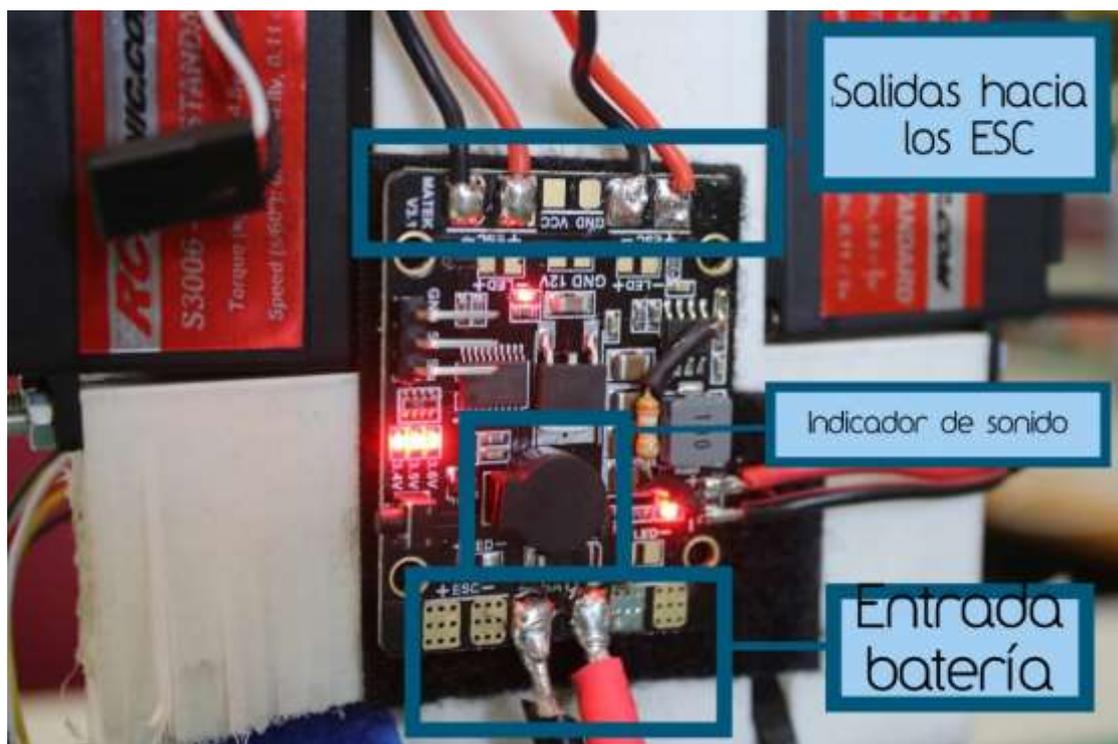


Ilustración 38: Placa de potencia

Este dispositivo, tal y como se observa en la imagen, tiene capacidad para alimentar un total de 4 variadores de velocidad, ya que es un componente diseñado para cuadricópteros. Sin embargo, debido a la fisionomía del dron, únicamente son utilizados los 2 terminales que quedan más próximos a los ESC.

En la ilustración 34 se han marcado diferentes partes del dispositivo:

- Entrada de la batería: terminales que se conectan a la pila para abastecer de energía al circuito integrado y a los componentes de salida.
- Indicador de sonido: la frecuencia entre pitidos indica el nivel de la batería. Al aplicar potencia se emiten 4 pitidos que indican la correcta conexión.
- Salidas hacia los ESC: terminales a los que se conectan los 2 variadores de velocidad que se usan para el vuelo del dron.

La placa de potencia se convierte en un dispositivo esencial para el funcionamiento del dron, puesto que además de dar energía a los motores, alimenta también a la controladora de vuelo que se presenta en el siguiente apartado.

6.8. Controladora de vuelo: Beagle Bone Blue

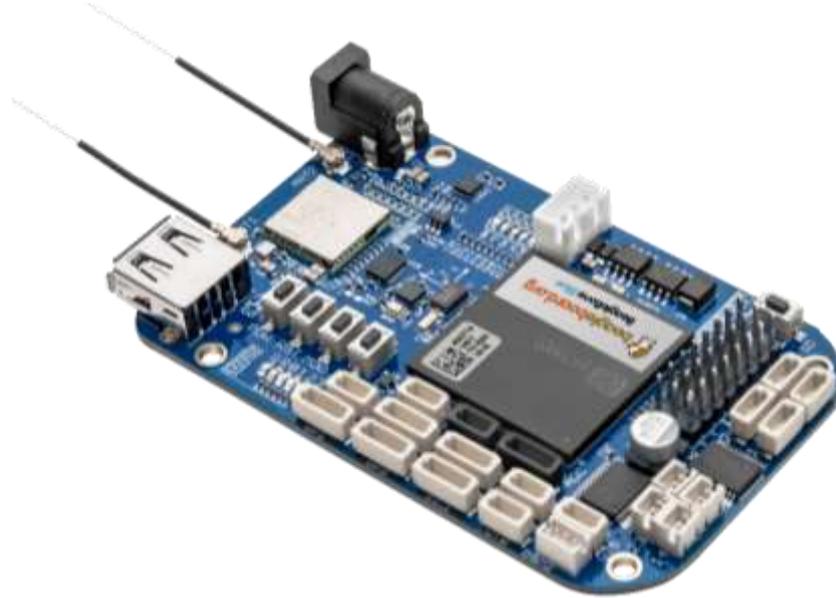


Ilustración 39: Beagle Bone Blue

La BeagleBoard BeagleBone® Blue es una potente microcontroladora que servirá como controlador de vuelo para el dron. Esta placa posee una unidad inercial de 9 grados de libertad, un microprocesador y unas conectividades que permiten este cometido.

El controlador en cuestión soporta el sistema operativo Linux y gracias al software libre ArduPilot se obtiene la base para la programación y el control del aparato. Este es el motivo principal por el cual se ha escogido esta microcontroladora en lugar de cualquier otra. Las características más importantes son:

- AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8 processor
- 512MB DDR3 RAM
- 4GB 8-bit eMMC flash storage
- Integrated power management
- 2×32-bit 200-MHz programmable real-time units (PRUs)
- NEON floating-point accelerator
- ARM Cortex-M3
- USB2 client for power & communications, USB2 host
- Programmed with Debian Linux
- Conexión por cable Ethernet o WIFI

En la siguiente imagen se muestra la función de cada uno de los módulos de la Beagle Bone Blue.

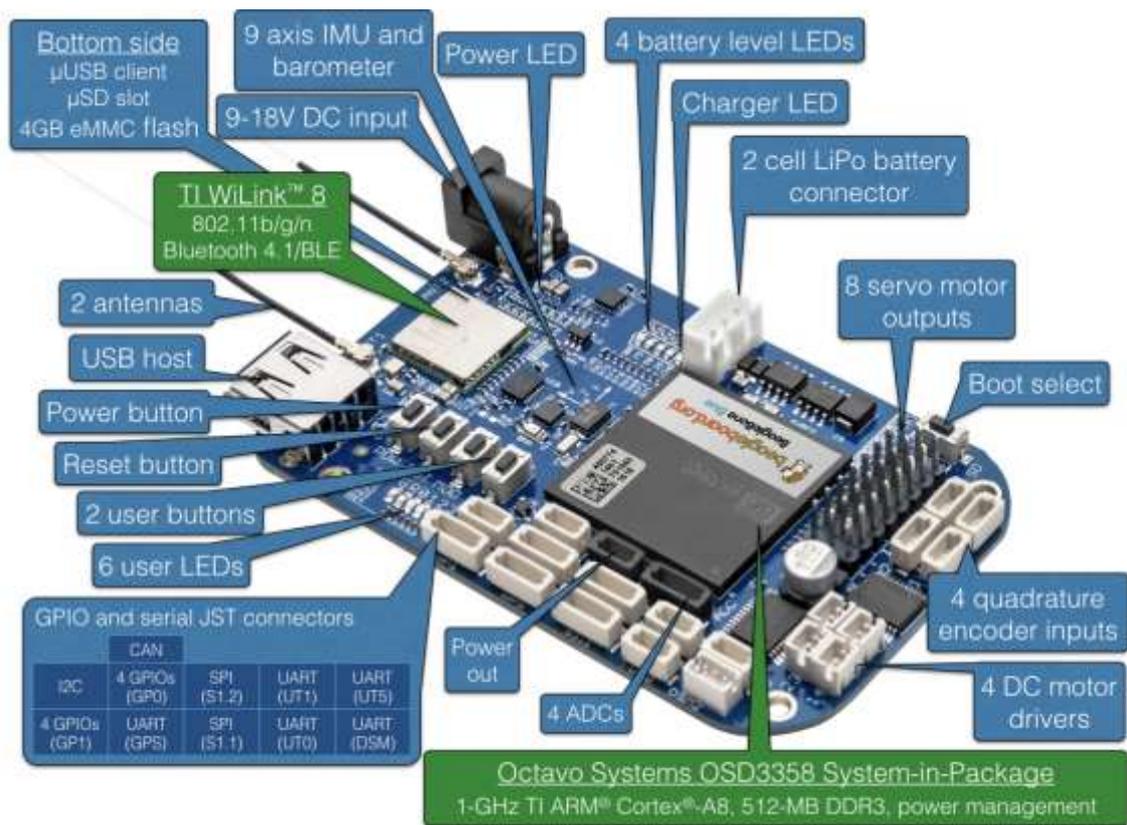


Ilustración 40: Diagrama PIN OUT

Gracias a la versatilidad de esta placa se pueden mandar diferentes señales a través de 8 canales diferentes. En nuestra aplicación únicamente se utilizarán 3: 1 para alimentar los 2 motores y 2 para alimentar a los 2 servos que determinan el giro de los propulsores. Las señales de salida son PWM, es decir, de modulación por ancho de pulso. La salida para determinar la velocidad de giro de los motores se da por el canal 3, mientras que las salidas de los servos se dan por los canales 1 y 2.

Además de esto, la Beagle Bone Blue alimentará el receptor y recibirá las señales de la emisora. La alimentación de la Beagle Bone Blue se realizará a través del puerto de entrada para una batería Lipo de 2 celdas.



Ilustración 41: Cableado en la Beagle Bone Blue

6.9. Emisora y receptor de radio



Ilustración 42: Emisora FlySky FS-16X

La emisora utilizada es un FlySky de 6 canales, la cual utiliza un emisor para drones de carreras de 2,4GHz. Esta emisora está alimentada por 4 pilas de 1,5V. Mediante este sistema se controlaran los siguientes movimientos: potencia, alabeo, cabeceo y guiñada.

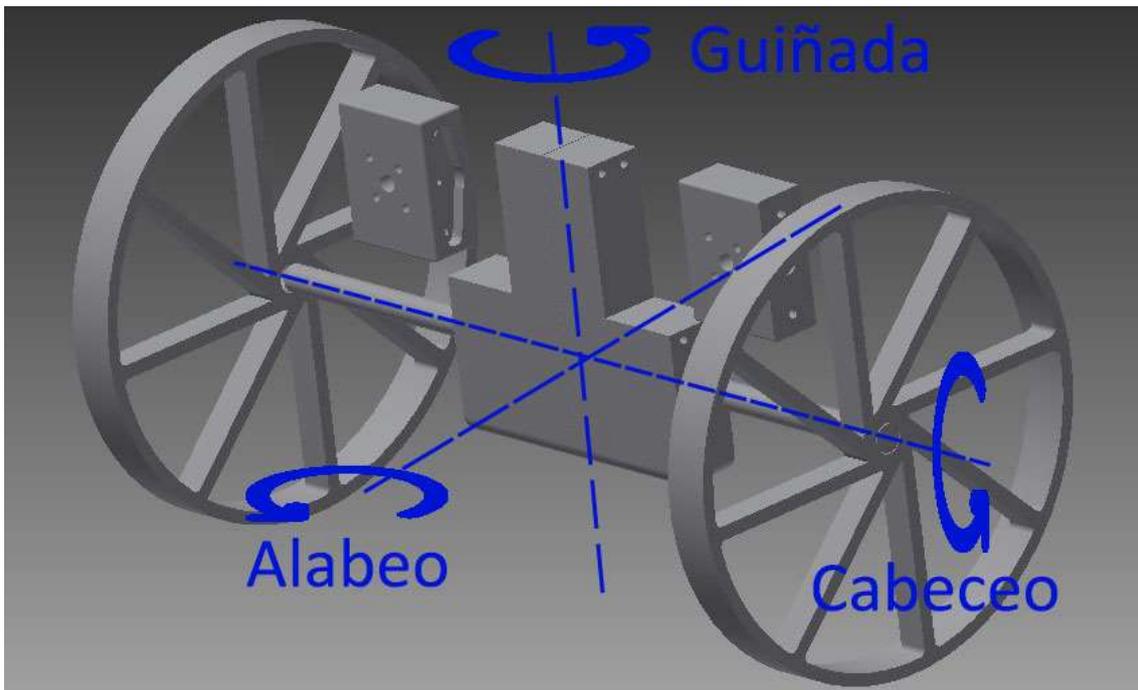


Ilustración 43: Ejes de rotación del dron

La forma de controlar la potencia de los motores, el alabeo, la guiñada y el cabeceo es mediante la posición de los 4 sticks de los que dispone la emisora. En el siguiente esquema se muestra el movimiento de cada uno de los sticks y su acción sobre el dron:



Con el movimiento vertical u horizontal de cada uno de los sticks de la emisora se modifica la señal que recibe el receptor. Estas señales son computadas por la controladora de vuelo e intervienen en el control del dron bimotor tilt rotor como referencias de cabeceo, alabeo y guiñada.

Además, la emisora nos permitirá seleccionar entre distintos modos de funcionamiento como podrían ser: manual, automático, vuelo circular, etc. La forma de conmutar entre dichos modos de vuelo se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 44: Modos de vuelo

El receptor empleado tiene un tamaño muy reducido y su peso es inferior a 20 gramos. Se trata de un dispositivo comúnmente utilizado en drones de carreras y totalmente utilizable para nuestra aplicación.

El receptor tiene capacidad para leer la información de 6 canales diferentes, aunque en nuestro control únicamente haremos uso de 4: acelerador, alabeo, profundidad y modo de vuelo. La alimentación del receptor viene de uno de los puertos de la controladora de vuelo Beagle Bone Blue.

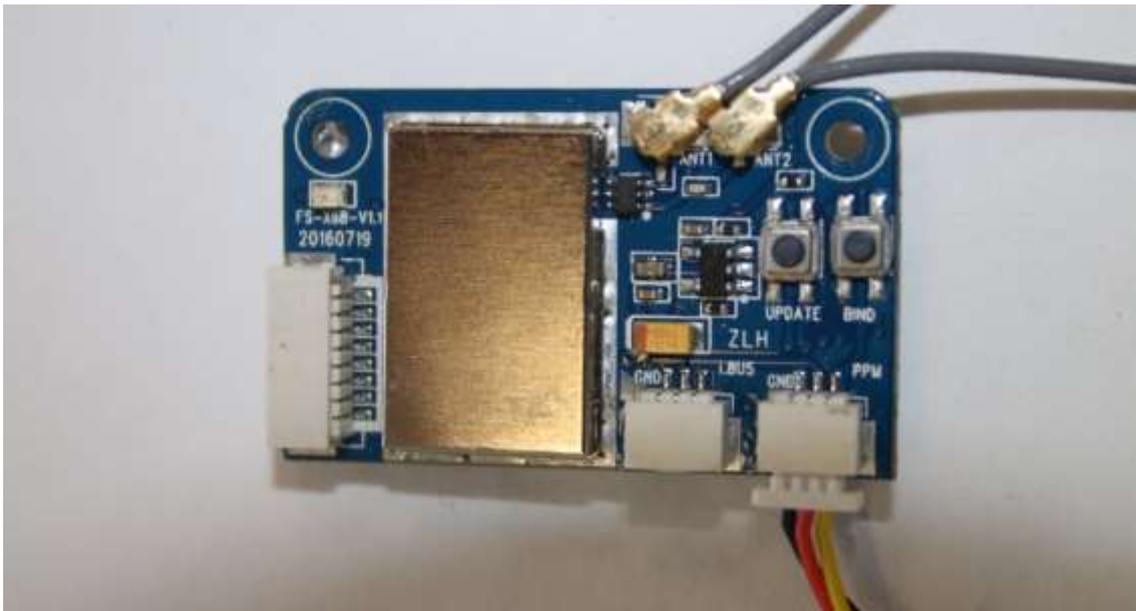


Ilustración 45: Receptor

El tipo de conexión entre el receptor y la controladora de vuelo Beagle Bone Blue es SBUS. En la imagen anterior se puede apreciar la salida por PPM, en la que se usa únicamente un cable para transmitir la señal de los distintos canales.

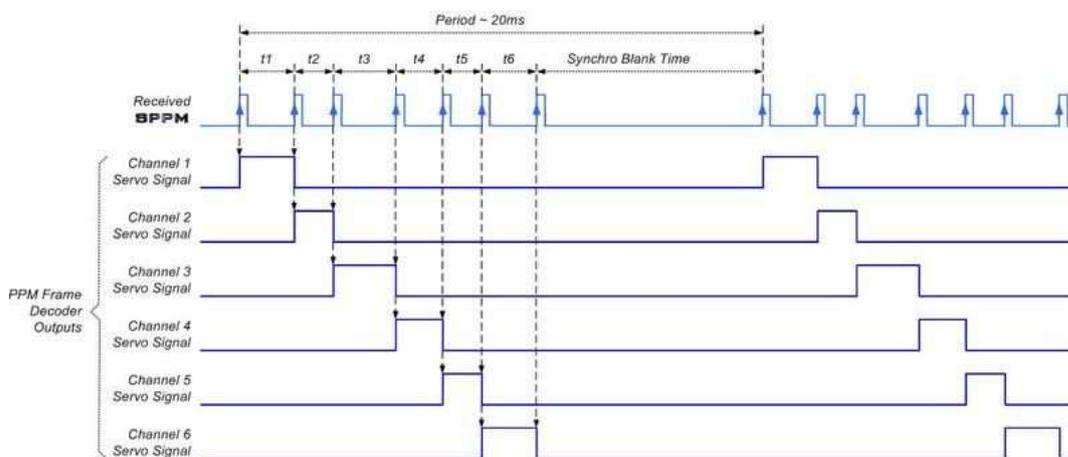


Ilustración 46: Modulación PPM

La modulación PPM (Modulación por posición del punto) es un tipo de protocolo de comunicación en el que con solo un cable de señal se puede transmitir información de diferentes canales según la longitud del tiempo de ciclo de cada canal.

6.10. Situación y conexión de los componentes electrónicos

Dado el reducido peso de los circuitos integrados y del receptor, su situación sobre la superficie del chasis fue determinada completamente por la cercanía entre conexiones y la facilidad para montar y desmontar dichos módulos.

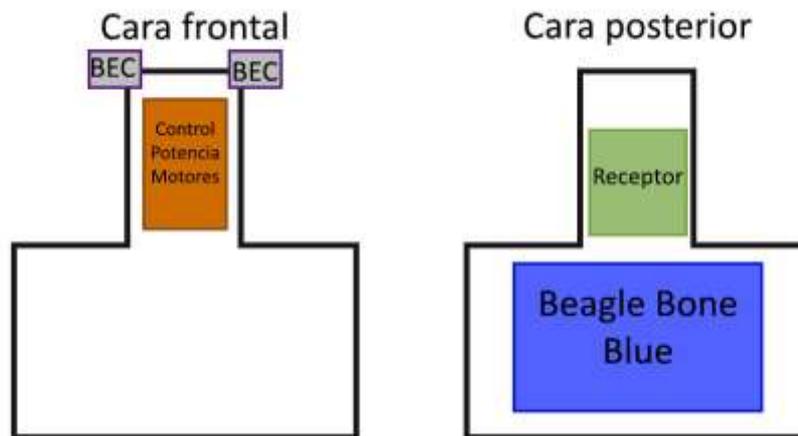


Ilustración 47: Situación de la electrónica

Continuando con esta idea, tal y como se aprecia en la imagen superior, el controlador de potencia de los motores se sitúa próximo a los variadores de velocidad (ESC). En la otra cara del chasis, el receptor y la BeagleBone Blue se sitúan ocupando la totalidad de la superficie disponible, lo que prueba que el tamaño del aparato es el mínimo para alojar toda la electrónica necesaria para su funcionamiento.

Con tal de separar el centro de gravedad del dron todo lo posible del eje de rotación de los servos, es importante situar la batería en el extremo opuesto para que el brazo respecto a dicho eje fuera todo lo grande posible. Además, situar la batería como extremo del dron facilita la ventilación, lo que sin duda es una ventaja para evitar problemas de fiabilidad.

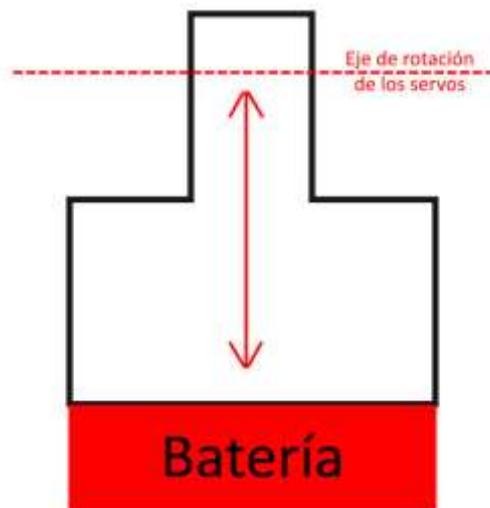


Ilustración 48: Situación de la batería

A partir de la ilustración 47 mostrada anteriormente en la que se describe la posición de cada uno de los módulos que componen el sistema, a continuación se mostrarán las conexiones entre cada uno de dichos elementos.

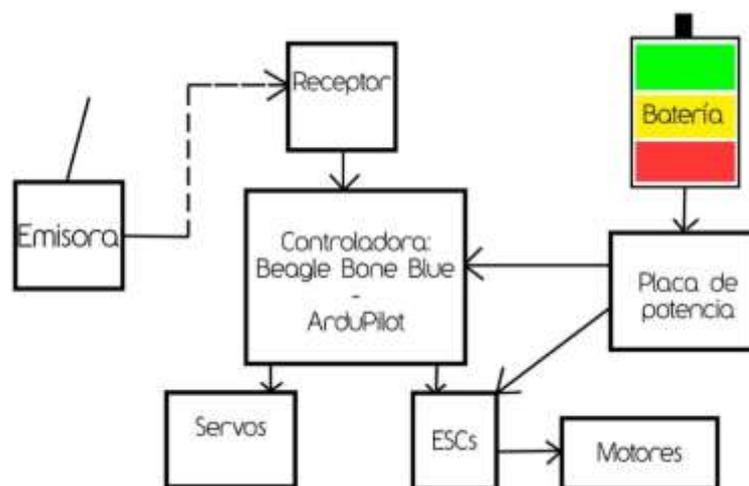


Ilustración 49: Esquema de conexiones electrónicas

En la imagen anterior se puede apreciar un esquema completo de las conexiones electrónicas existentes entre los distintos elementos que componen el conjunto del dron. La única fuente de potencia es la batería, la cual tiene una única conexión con la placa de potencia. La placa de potencia distribuye energía a la controladora de vuelo y también a los ESC directamente.

Como se explica en apartados anteriores, las referencias son establecidas en la emisora y son captadas por el receptor, el cual está conectado a la BeagleBone Blue a través del puerto PWR para alimentarse y a través del puerto Encoder 4 para transmitir la información.

La controladora Beagle Bone Blue es el cerebro del esquema, ya que capta los inputs y los transforma en outputs en forma de impulsos que a través de los puertos de salida para servomotores aportan entradas a los 2 ESCs y a los 2 servomotores.

Tras situar los componentes electrónicos y la batería, el conjunto del chasis del dron más los motores y sus plataformas de sujeción queda finalizado. El resultado es el siguiente:

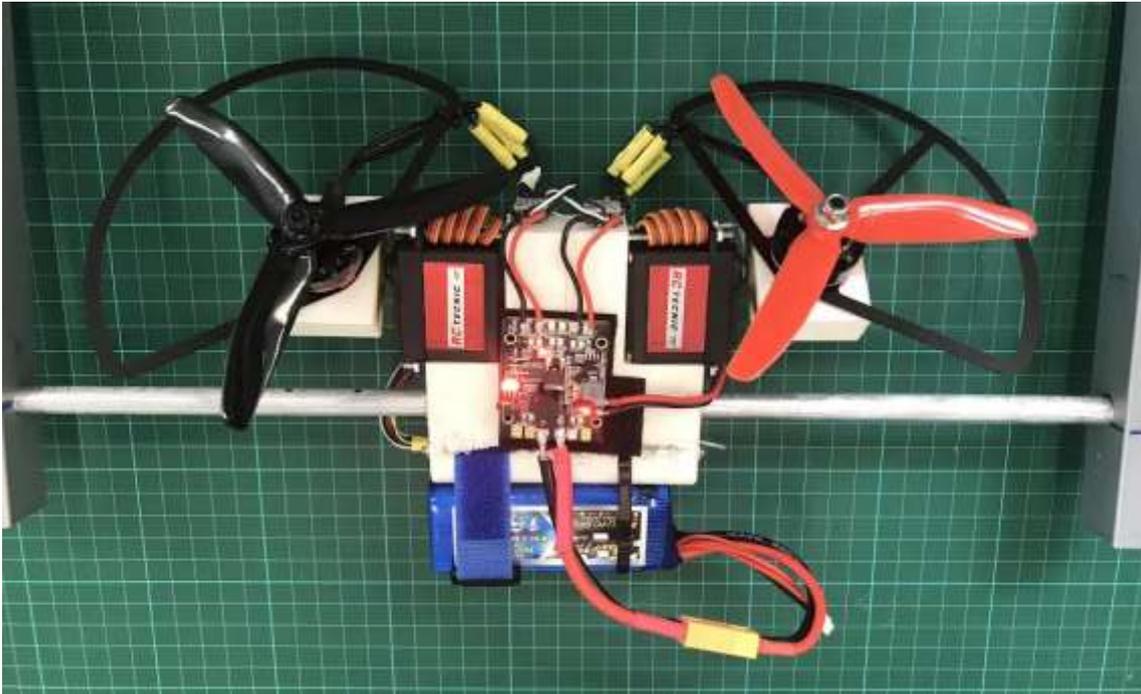


Ilustración 50: Montaje completo del dron

Una vez finalizado el montaje, el dron fue instalado en una plataforma de sujeción desde la cual se desarrollaría la algoritmia necesaria para controlar el sistema. La construcción de la estructura y la colocación del dron en la misma se abordan en el punto 6.2.

7. Desarrollo del control

En el 7 punto de esta memoria se detallará el proceso seguido desde el fin del montaje completo del conjunto dron-plataforma-electrónica hasta la obtención de un modo de vuelo propio en el que se detallen una serie de parámetros del PID que determinará la dinámica del cabeceo del dron.

7.1. Presentación del sistema

Dada la complejidad de la superposición de sistemas en este proyecto, en el presente punto se describe la relación entre los diferentes componentes utilizados en el desarrollo, que son los siguientes:

- Ordenador
- Windows 10
- Ubuntu
- Beagle Bone Blue
- QGround Control

El microprocesador que se utiliza como controladora de vuelo: Beagle Bone Blue es el eje del proyecto, ya que los algoritmos que se desarrollan se cargan sobre la placa, es esta misma placa la que calcula las acciones de control y además es el medio que permite visualizar el estado del sistema a través de QGround Control.



Ilustración 51: Esquema de control

El ordenador que se utiliza es un HP Envy 15 Notebook cuyo sistema operativo es Windows 10. Con el objetivo de navegar a través de la placa y realizar diferentes acciones como trasvase de archivos o compilar, se instaló la aplicación de Linux Ubuntu.

Mediante el sistema operativo Linux Ubuntu se pueden realizar todas las acciones previas a las pruebas de vuelo, como son: abrir el compilador, cambiar el código, compilar, trasvase de datos y ejecución del programa existente en la microcontroladora.

De esta forma, desde Linux se puede abrir el entorno de trabajo Eclipse OXY con el que se modifica el código existente en la carpeta de ArduPilot BBBlue. Una vez compilado el código, éste se puede enviar a la BeagleBone Blue a través de wifi mediante el protocolo ssh.

Con el código ya en la placa, basta con ejecutarlo desde Linux Ubuntu para que el sistema comience a funcionar y se pueda validar el funcionamiento de los diferentes modos de vuelo.

QGround Control permite visualizar permanentemente el estado del dron y de la emisora gracias a que el ordenador queda conectado mediante wifi a la BeagleBone Blue incluso cuando se está ejecutando ArduPilot.

ArduPilot es un código libre en el que se hallan diferentes modos de vuelo para diversos aparatos como aviones, coches, barcos, submarinos, helicópteros y drones. Lo que se realiza en este proyecto es una modificación de ese código para adaptarlo a las necesidades del dron bimotor tilt rotor y se realiza un controlador para el control del cabeceo.

7.2. Modificaciones en ArduPilot

En el presente punto se muestra la estructura del código que se utiliza en el proyecto, qué es ArduPilot y que partes de ArduPilot se modifican para incluir el control del cabeceo que se realiza.

ArduPilot es un software libre diseñado para el control de vehículos no tripulados. El desarrollo de este código se inició en 2009 y, mediante C++ y Python, se consiguen diferentes estructuras de control para aviones, helicópteros y otras clases de vehículos aéreos, terrestres y marítimos.

Este software está segmentado dependiendo de la clase de vehículo que se utilice, de forma que el código para el control de un rover (vehículo de exploración espacial) es muy diferente al de un helicóptero o al de un avión. En nuestro caso, se parte de ArduPlane como base y se realiza el siguiente desarrollo:

- Creación de una función de estabilización propia
- Inclusión de dicha función en uno de los modos de vuelo operativo del dron
- Capacidad para conmutar entre vuelo manual y estabilizado

Resumiendo, ArduPilot es un software que dispone de diferentes códigos para diferentes aplicaciones; en este proyecto se hace uso de ArduPlane. Cada código tiene diferentes modos de vuelo que cambian el comportamiento del vehículo; en este caso se hace uso del modo de vuelo training.

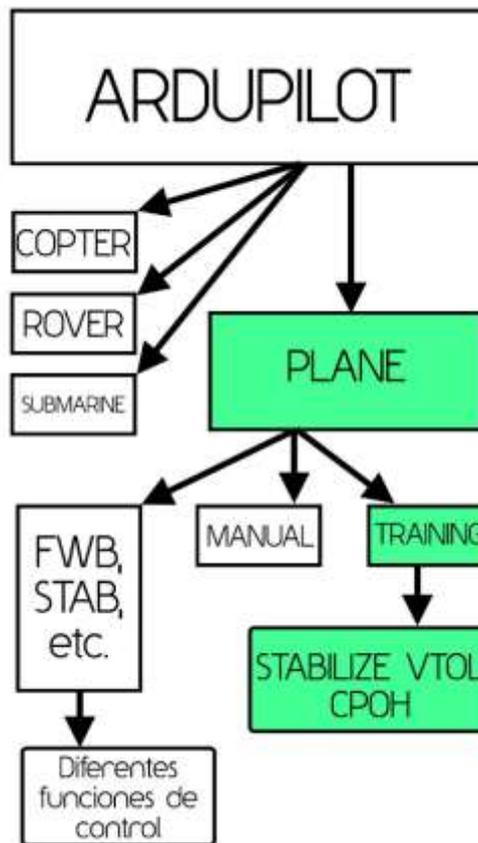


Ilustración 52: Esquema de ArduPilot

En el último escalón del software encontramos las funciones que realizan el control del dron y que son llamadas por los diferentes modos de vuelo. Aquí es donde se creó la función `Stabilize_vtol_cpoh`, en la que se incluye el control del aparato.

7.3. Configuración de la placa

A través del siguiente punto se expondrá de manera cronológica los pasos seguidos desde que se inició por primera vez la placa integrada Beagle Bone Blue hasta que se tuvo una configuración inicial del programa ArduPilot.

Una vez finalizada la explicación de la configuración de la Beagle Bone Blue, se muestra como se modifica el código y se carga en la placa. A continuación, el proceso seguido para configurar la placa y cargar ArduPilot (en cursiva se mostrará el código tecleado en Linux Ubuntu):

1. Actualización del software:

```
sudo apt update && sudo apt upgrade -y
```

2. Instalación del nuevo software:

```
sudo apt install -y bb-cape-overlays cpufrequtils
```

3. Frecuencia del reloj igual a 1GHz

```
sudo sed -i 's/GOVERNOR="ondemand"/GOVERNOR="performance"/g' /etc/init.d/cpufrequtils
```

4. Actualizar scripts:

```
cd /opt/scripts && sudo git pull
```

5. Maximizar el tamaño de uso de la micro SD:

```
sudo /opt/scripts/tools/grow_partition.sh
```

6. Instalar Kernel 4.9:

```
sudo /opt/scripts/tools/update_kernel.sh --ti-rt-channel --lts-4_9
```

7. Determinar los binarios de inicio del dispositivo:

```
sudo sed -i 's/#dtb=/dtb=am335x-boneblue.dtb/g' /boot/uEnv.txt
```

8. Reseteo:

```
sudo reboot
```

9. Descargar ArduPlane a través del siguiente link:

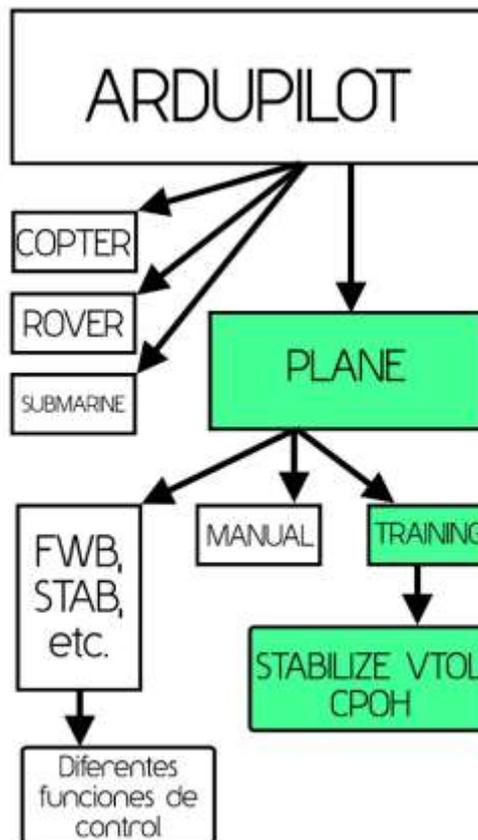
<http://bbbmini.org/download/blue/>

10. Copiar ArduPlane en la Beagle Bone Blue:

```
scp "origen" "destino"
```

7.4. Elaboración de la función `Stabilice_vtol_cpoh`

Con la BeagleBone Blue configurada y lista para funcionar, se creó una función para el control del cabeceo llamada `Stabilice_vtol_cpoh`, cuyo nombre hace alusión a estabilizar, a Vtol (en inglés siglas de Vertical Take-Off and Landing) y al grupo de Control Predictivo y Optimización Heurística. Esta nueva función será llamada por el modo de vuelo Training tal y como se detalla en el siguiente esquema (Imagen 52).



Así, la función creada se deposita en el archivo AP_PitchControl y tiene el siguiente aspecto:

```
int32_t AP_PitchController::get_servo_out_vtol_cpoh(int32_t angle_err, float scaler, bool disable_integrator)
```

Para probar el correcto funcionamiento del compilador EclipseOXY y de la BeagleBone Blue, se realizó un código de prueba con el que se accionan todos los actuadores manualmente, es decir, cada uno de los motores y los 2 servos.

La instrucción `SRV_Channels::set_output_scaled` recibe un canal de salida y un valor entero y escribe ese valor en forma PWM en el canal determinado. Con esta función se puede probar el correcto funcionamiento de la BBB.

```
int32_t AP_PitchController::get_servo_out_vtol_cpoh(int32_t angle_err, float scaler, bool disable_integrator)
{
  SRV_Channels::set_output_scaled(SRV_Channel::k_aileron, channel_roll->get_control_in_zero_dz());
  SRV_Channels::set_output_scaled(SRV_Channel::k_elevator, channel_pitch->get_control_in_zero_dz());
  SRV_Channels::set_output_scaled(SRV_Channel::k_rudder, channel_rudder->get_control_in_zero_dz());
  SRV_Channels::set_output_scaled(SRV_Channel::k_throttle, channel_throttle->get_control_in_zero_dz());
}
```

Tal y como se detalla en las librerías de ArduPilot, cada canal tiene asignada una constante a la que referirse para la escritura. Las constantes se detallan en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor	Significado
SERVO1_FUNCTION	4	aileron
SERVO2_FUNCTION	19	elevator
SERVO3_FUNCTION	70	throttle
SERVO4_FUNCTION	21	rudder

Ilustración 53: Tabla de salida de servos

De esta forma, escribir `k_aileron` o `k_elevator` es igual a escribir "4" o "19" y mediante dichas constantes se escoge el canal de salida de la controladora Beagle Bone Blue (parte azul del código).

7.5. Conexión de la controladora de vuelo

En las fases previas de configuración y prueba, la conexión entre el ordenador y el dron se realizó vía Ethernet por USB. Sin embargo, la puesta en marcha de los motores con las hélices equipadas, hace inviable que el dron pueda mantenerse conectado con un cable al ordenador. Por ello, el primer paso en la elaboración del control del cabeceo fue conectar la BBB al pc vía wifi.



Ilustración 54: Wifi BeagleBone Blue

Tras esto, fue necesario acceder a la Beagle Bone Blue desde Ubuntu mediante la siguiente sentencia:

```
ssh debian@192.168.8.1
```

```
password: tempwd
```

Una vez esto hecho esto ya se disponía de la vía necesaria para llevar el código a la placa y visualizar mediante la estación de tierra el estado del equipo en todo momento.

En una nueva ventana de Ubuntu se abrió el entorno de programación eclipseOXY:

```
cd eclipse
```

```
./eclipseOXY
```

Es necesario explicar que el comando "cd" permite acceder a un directorio determinado, mientras que "./" abre un archivo ejecutable.

Una vez abierto eclipse, fue necesario estudiar el código existente para entender la arquitectura del mismo y establecer un plan para el desarrollo de las nuevas funciones.

ArduPilot, como ya se explica en anteriores puntos de este proyecto, es un código base que puede ser utilizado para controlar y monitorizar diferentes vehículos como aviones, helicópteros, cuadricópteros, barcos y vehículos terrestres. ArduPlane es la variante de ArduPilot diseñada para aeroplanos. Este código incluye funciones de escritura sobre servos para el control del cabeceo, alabeo y guiñada, de forma que se convierte en un buen punto de partida para el dron bimotor tilt rotor.

En el control del pitch, existe una referencia que es al ángulo de cabeceo del dron deseado y también hay una salida que es el ángulo de cabeceo actual. El error será la resta de la referencia menos la salida. Por ello, previo a la implementación de un regulador era necesario reconocer la variable que devuelve el ángulo de pitch del dron.

Esta variable es `ahrs.pitch_sensor`, al igual que existen otras 2 variables que determinan el estado del alabeo (roll) y de la guiñada (yaw): `ahrs.roll_sensor` y `ahrs.yaw_sensor`. Mediante el siguiente código se consigue que la salida de uno de los servos sea igual al ángulo de cabeceo del dron:

```
//----- PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO -----  
  
//Salida es igual a pitch del dron por canal de alabeo  
  
SRV_Channels::set_output_scaled(SRV_Channel::k_aileron,ahrs.pitch_sensor);
```

La función recientemente mostrada es vital para el desarrollo del proyecto y conseguirla no fue tarea fácil. Sin lugar a dudas, esta fue una labor de búsqueda que abrió una vía para llevar a lo físico el regulador que se iba a diseñar.

Además de la creación de una nueva función, proceso que se detalla en el apartado 7.4. de esta memoria, es necesario llamar a dicha función desde uno de los modos de vuelo operativos de ArduPlane. El modo escogido fue training, para diferenciarlo de otros modos como “Stabilice” o “Manual”.

La forma de incluir la función en el modo de vuelo training fue comentando la función que inicialmente se ejecutaba e incluyendo nuestra propia función:

```
if (control_mode == TRAINING) {  
    //stabilize_training(speed_scaler); -----→ Antigua función: no se ejecuta  
    stabilize_vtol_cpoh(speed_scaler); -----→ Nueva función  
}
```

Con estas modificaciones, se probó el correcto funcionamiento de las mismas. Para ello se ejecutó la aplicación QGround que monitoriza el estado del dron, controla los modos de vuelo y también permite realizar calibraciones de la emisora y diferentes sensores.

Para lanzar el archivo de ArduPilot a QGround es necesario teclear la siguiente sentencia:

```
debian@beaglebone:~$ ls
arducopter-3_5_4 ArduPilot888BlueDebug arduplane arduplane-3_8_3 bin
debian@beaglebone:~$ sudo /home/debian/arduplane -C udp:192.168.8.10:14550
```

Ilustración 55: Ejecutar código arduplane

Una vez hecho esto, QGround tomó el siguiente aspecto:

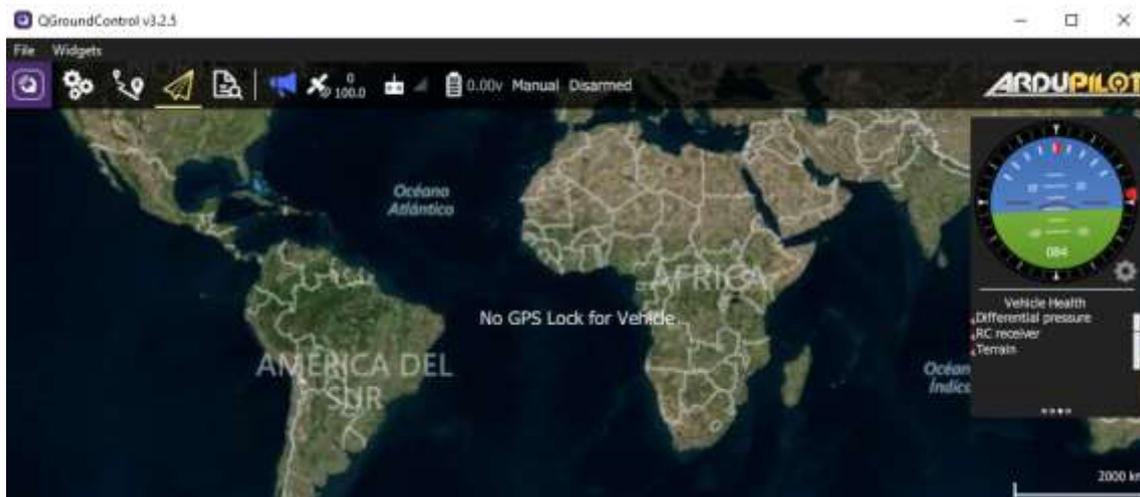


Ilustración 56: QGround vista general

Donde se puede apreciar la orientación actual del dron, así como se pueden armar y desarmar los motores y también se monitoriza el modo de vuelo actual. Armar los motores permite que estos giren, mientras que si están desarmados (Disarmed), no se mueven por motivos de seguridad.

Para modificar el modo de vuelo es necesario cambiar la posición de uno de los conmutadores de la emisora. Si se mantiene en la posición inicial (arriba), se ejecuta el modo de vuelo manual, donde los sticks de alabeo y profundidad mueven los servos del dron y donde el stick del acelerador varía la velocidad de los motores.

Efectivamente, el dron respondía correctamente a los cambios de modo de vuelo y cumplía con el código establecido en el modo stabilize_vtol_cpoh. Dada esta situación, sólo quedaba obtener el regulador necesario para estabilizar el movimiento de cabeceo del dron.

7.6. Control del cabeceo

Dadas las características del proyecto: diseño propio, impresión en 3D y montaje y validación a mano, como primera aproximación se ha utilizado una estructura de control basada en PID mediante ajuste experimental. Para comenzar, se optó por un regulador P.

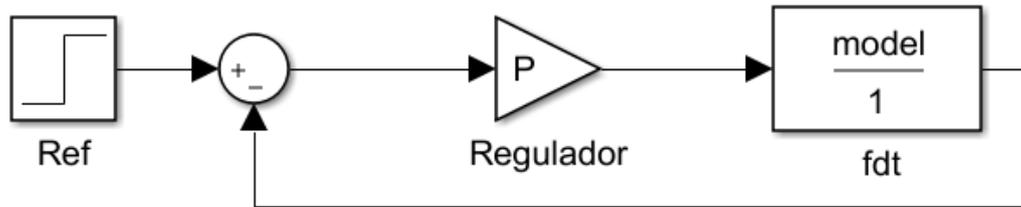


Ilustración 57: Esquema de control

En control, el error es igual a la diferencia entre la referencia y la salida. En un sistema estable y sin error de posición ante entradas de escalón, el error se reduce paulatinamente hasta que éste es igual a 0. Sin embargo, el tiempo que transcurre desde que se tiene una nueva referencia hasta que la salida alcanza dicha referencia (tiempo de establecimiento) en ocasiones es muy grande y es necesario implementar un regulador para mejorar la dinámica del sistema.

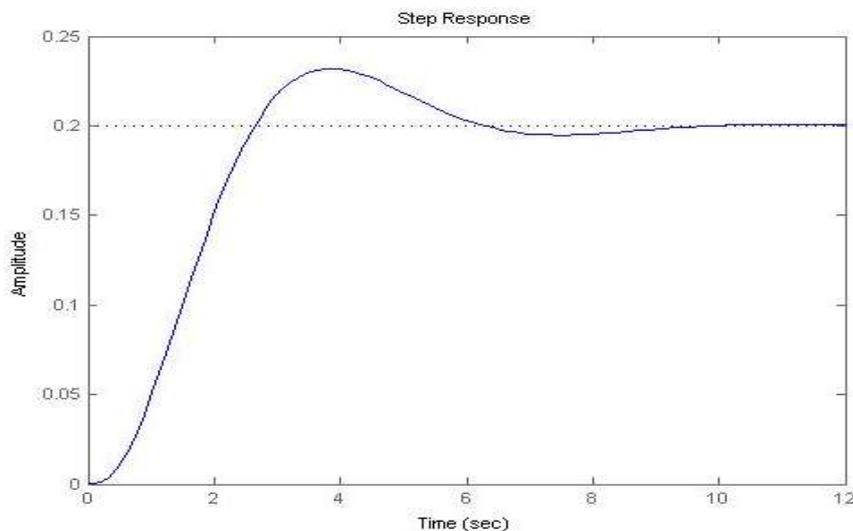


Ilustración 58: Respuesta a escaló en BC

Para hacer que el tiempo de establecimiento sea menor, dependiendo de la dinámica de BC del sistema, una de las técnicas que se pueden emplear es un regulador proporcional, que multiplica el error por una constante y hace que el número de instantes de tiempo necesarios para alcanzar la referencia sea inferior. No obstante, aumentar en exceso la constante P puede generar sobreoscilación (sobrepasar la referencia) e incluso podría hacer que el sistema fuese inestable, cuando la salida es un valor que oscila alrededor de la referencia. La peor de las consecuencias al aumentar en exceso el valor del regulador proporcional sería hacer que el sistema pase a ser inestable.

A continuación se expone el código desarrollado en la función `stabilize_vtol_cpoh` para implementar un regulador proporcional para controlar el cabeceo del dron:

Referencia = 0 grados, es decir, que el dron se mantenga vertical.

```
int32_t AP_PitchController::get_servo_out_vtol_cpoh(int32_t angle_err, float scaler, bool
disable_integrator)
{
    //Constantes
    int32_t u_k;
    static int32_t angle_err_k_1 = 0;
    //Acción proporcional
    u_p_k = int32_t((gains.P*10)*((float)angle_err));
    //Acción total
    u_k = u_p_k;
    //Actualización de variables
    angle_err_k_1 = angle_err;
    return u_k;
}
```

En el apartado de resultados obtenidos se realizará un balance de los ensayos realizados. A continuación, se mostrará el código desarrollado para implementar un regulador Proporcional-Derivativo.

Un regulador PD es igual a la suma de la acción de control de un regulador P más la acción de control de un regulador D.

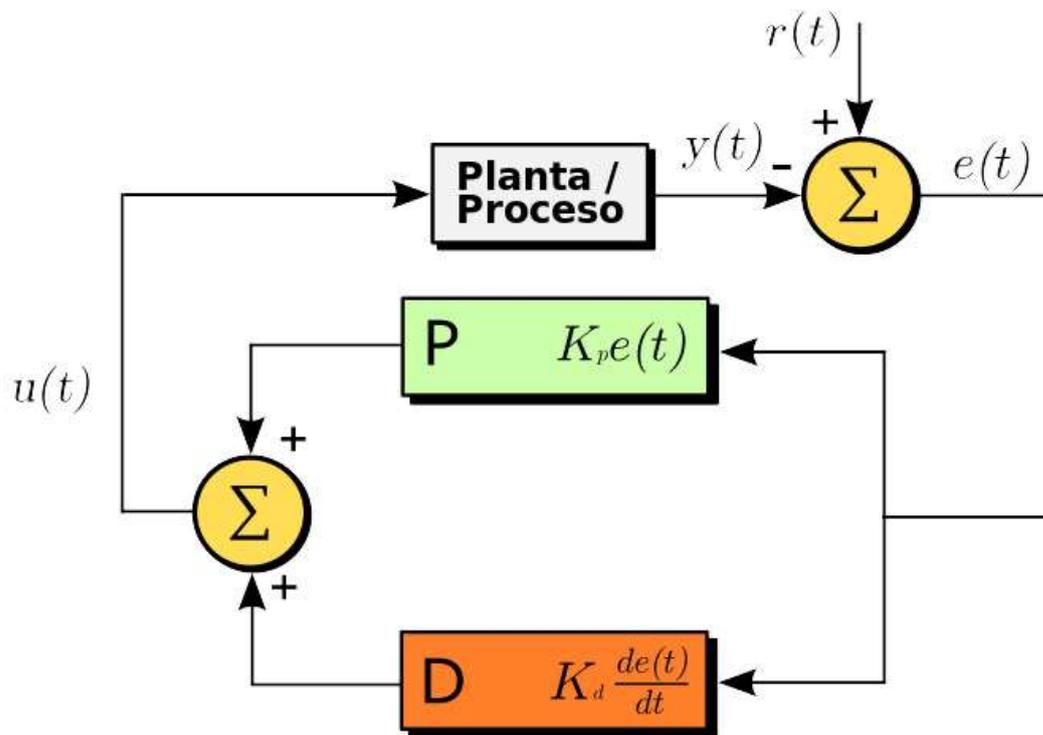


Ilustración 59: Esquema del regulador PD

Una acción derivativa se muestra cuando hay un cambio en el valor absoluto del error, es decir, cuando el error no es constante, durante el periodo transitorio. El objetivo de la acción derivativa es hacer que el error sea permanentemente 0, por eso actúa de forma inmediata cuando hay un aumento del valor absoluto del error. Además, el regulador derivativo tiene una acción proporcional a la rapidez con la que aumenta o disminuye el error.

$$D_{salida} = K_{Derivativa} \cdot \frac{d \text{err}}{dt}$$

Ante una referencia escalon, una constante derivativa muy grande hace que se reduzcan las oscilaciones, pero aumente el tiempo de establecimiento. Al contrario, con una constante derivativa pequeña se tienen más oscilaciones en el transitorio, pero la duración de éste es inferior.

En la siguiente página se muestra el código desarrollado para implementar un regulador PD en la función `stabilize_vtol_cpoh`:

```

int32_t AP_PitchController::get_servo_out_vtol_cpoh(int32_t angle_err, float scaler,
bool disable_integrator)
{
    //Constantes
    int32_t u_k;
    int32_t u_p_k;
    int32_t u_d_k;
    int32_t dt = 400;
    static float angle_err_int = 0;
    static int32_t angle_err_k_1 = 0;
    //Acción proporcional
    u_p_k = int32_t((gains.P*10)*((float)angle_err));
    // Acción derivativa
    u_d_k = int32_t((gains.D*10)*(float)(((angle_err - angle_err_k_1)*dt)));
    //Acción total
    u_k = u_p_k + u_d_k;
    //Actualización de variables
    angle_err_k_1 = angle_err;
    return u_k;
}

```

En el apartado de resultados obtenidos se realizará un balance de los ensayos realizados para los diferentes valores del regulador PD.

7.7. Modificación de la referencia

La última modificación en la configuración del código de este proyecto vino asociada a un cambio en el valor de referencia para el ángulo de cabeceo. Durante la fase previa se realizaron ensayos para un pitch igual a 0 grados y ahora la referencia de pitch ha pasado a ser un valor cambiante que será determinado por la emisora mediante el stick del cabeceo que será leído con la siguiente instrucción:

```
int32_t pitchRef = channel_pitch->get_control_in_zero_dz();
```

Tras incluir como referencia el valor del stick del pitch de la emisora, el comportamiento del dron fue correcto. En esta aplicación, al ser la posición inicial del stick igual a 0 grados, el dron realiza el mismo movimiento que en el anterior código, con la diferencia de que la referencia puede ser cambiada por un ángulo de cabeceo diferente.

Para tener un permanente control de la posición del cabeceo del dron y no forzarlo, se ha limitado la acción de los servos mediante el siguiente código implementado en Attitude.cpp.

```
u_k_aux = pitchController.get_servo_out_vtol_cpoh(ahrs.pitch_sensor - pitchRef, 0, false);  
  
if (u_k_aux > 5000)  
    u_k_aux = 5000;  
  
if (u_k_aux < -5000)  
    u_k_aux = -5000;
```

`u_k_aux` es la variable a la que se asigna el valor que devuelve el regulador implementado. Mediante las condiciones que aparecen subrayadas de color gris se limitan aquellas acciones de control que queden por encima de dichos límites.

Con las limitaciones realizadas, el ángulo máximo de rotación que se ha obtenido para los servos es de 40 grados. Igualmente, el ángulo máximo de pitch del dron se establece en 80 grados.

8. QGroundControl

QGround Control es una aplicación que monitoriza la orientación momentánea del dron, la situación del emisor y permite conmutar entre los distintos modos de vuelo que se hayan configurado en la controladora de vuelo. Asimismo, se puede variar las constantes de un PID, así como otros muchos parámetros en tiempo real.

Para abrir QGround únicamente es necesario ejecutar el programa:



Ilustración 60: Acceso directo a QGround

Una vez abierto, se observa como hay conexión y el horizonte artificial (también llamado indicador de actitud) monitoriza el alabeo, cabeceo y guiñada del dron. Al hacer pivotar el dron sobre la plataforma de test, varía el cabeceo del dron y por tanto se observa como la línea del horizonte artificial sube y baja.



Ilustración 61: Horizonte artificial o indicador de actitud

QGround Control tiene un gran peso en el proyecto debido a que a través de dicha aplicación se pueden variar los parámetros del regulador PID que se pretende diseñar en tiempo real. Esto quiere decir que durante la fase de test, con el dron y los motores en funcionamiento, se pueden modificar parámetros de control, lo que también modifica la dinámica de vuelo.

Para acceder a cambiar dichos parámetros es necesario acudir a la pestaña de ajustes:

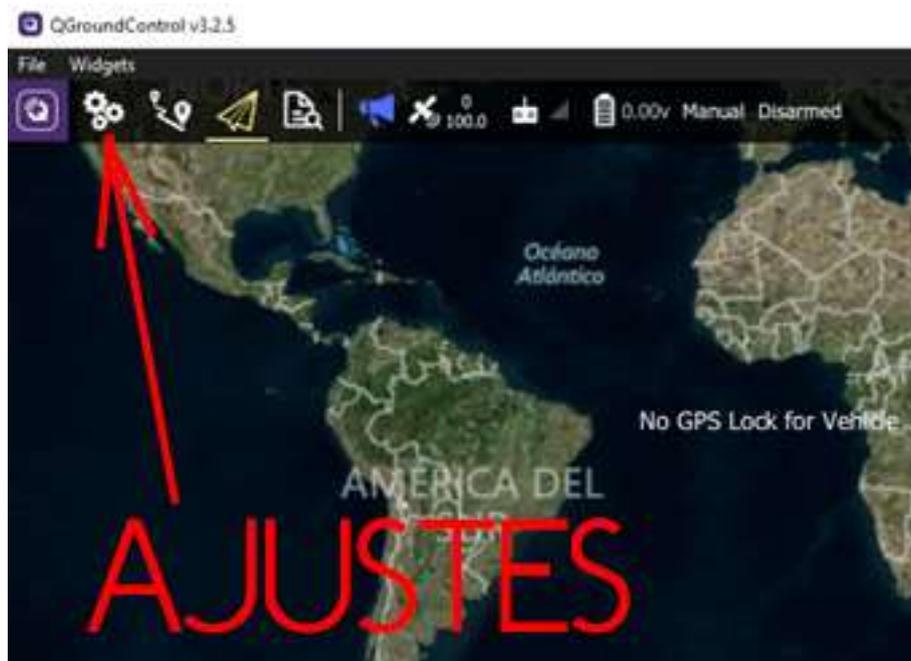


Ilustración 62: Ajustes QGround

Tecleando la palabra “gain” en campo de búsqueda del apartado parámetros, se obtienen las constantes asociadas a los valores K_p , K_d y K_i del regulador de pitch que tiene su salida por los servos. Dichos valores tienen los nombres PTCH2SRV_P, PTCH2SRV_D y PTCH2SRV_I y se encuentran remarcados en la siguiente imagen:



Ilustración 63: Parámetros del QGround

Al hacer clic sobre uno de los valores, se abre el siguiente campo. En dicho campo se puede modificar el valor de la constante dentro del rango de valores aceptado. Posteriormente es necesario clicar en “Save” para guardar dicho valor. Inmediatamente, el valor se actualiza y cambia el comportamiento dinámico del sistema.

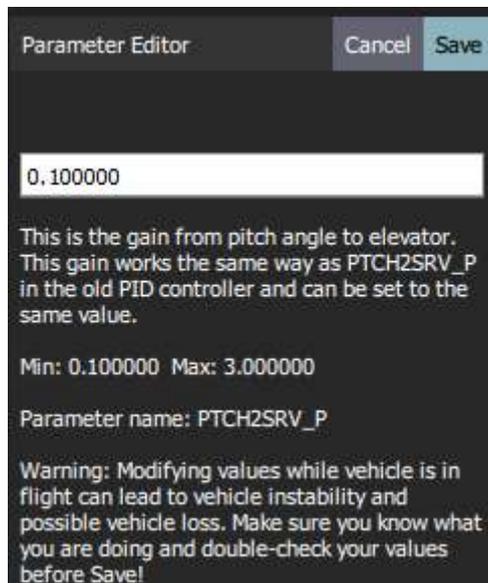


Ilustración 64: Editor de parámetros del QGround

Para un regulador P con constantes proporcionales entre 1 y 30, los tiempos de establecimiento comienzan en 2 segundos y caen progresivamente. Sin embargo, la mínima ventaja del tiempo de establecimiento no compensa el enorme aumento en la sobreoscilación que se da, ya que la dinámica es subamortiguada. Por esto, se decidió que el valor de la constante proporcional más adecuado es $K_p=1$.

QGround permite valores de entre 0 y 1 para la constante derivativa. Para valores muy pequeños de la constante derivativa, como por ejemplo $K_d=0,00001$, el comportamiento dinámico del sistema es idéntico al de un regulador proporcional. Al aumentar el valor de la K_d hasta 0,001, se obtuvo por primera vez un regulador que reducía el tiempo de establecimiento por debajo de 1 segundo.

Es necesario tener en cuenta que las pruebas se han hecho llevando el dron desde la posición de pitch de reposo (con los motores hacia abajo) hasta una referencia de pitch=0, con los motores hacia arriba. Esto quiere decir que el dron realiza un giro de 180 grados de cabeceo.

A partir de una K_d de 0,01, la respuesta dinámica del sistema empeora debido a las grandes acciones de control culpables del alto valor de la acción derivativa.

9. Resultados Obtenidos

Tras el diseño, la fabricación, la selección de componentes y el montaje del dron y la plataforma de test como conjunto, la última etapa de este proyecto fueron las pruebas. En dichas pruebas, el dron se fijó a la plataforma de test con un grado de libertad (cabeceo) y con el regulador anteriormente presentado, se obtuvieron los siguientes resultados para diferentes valores de aceleración de los motores.

Los motores del dron bimotor tilt rotor, al estar éste sujeto a la estructura, tienen que ejercer un menor empuje para conseguir la verticalidad del dron. Esto provoca que con valores de aceleración a partir del 14% se consiga alcanzar y mantener la verticalidad del dron. De hecho, a altas revoluciones, la respuesta es tan inmediata que la estabilización no es posible.

A continuación se presentan las gráficas y los análisis para distintos valores de aceleración. Todas las respuestas se refieren a un regulador PD con $K_p=1$ y $K_d=0,001$ con referencia de cabeceo= 0 grados.

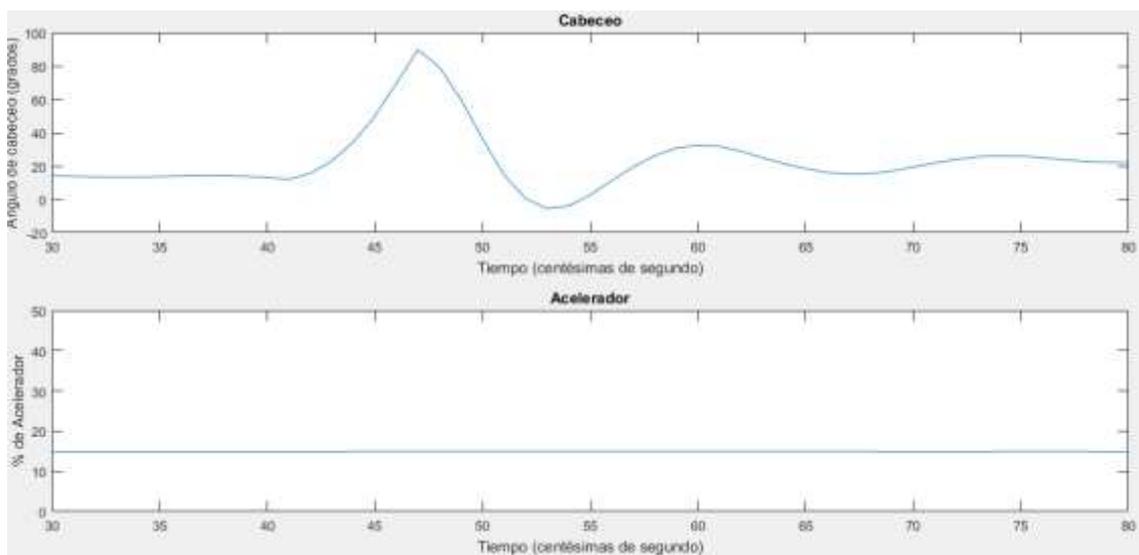


Ilustración 65: Respuesta del dron con 15% de acelerador

Los valores analíticos de la respuesta son:

- Tiempo de establecimiento (98%): 400 milisegundos
- % de sobreoscilación: 16%
- Tiempo de pico: 125 milisegundos
- Error de posición= 28 grados (15,5%)

Para un porcentaje de aceleración del 20%, el resultado es el siguiente:

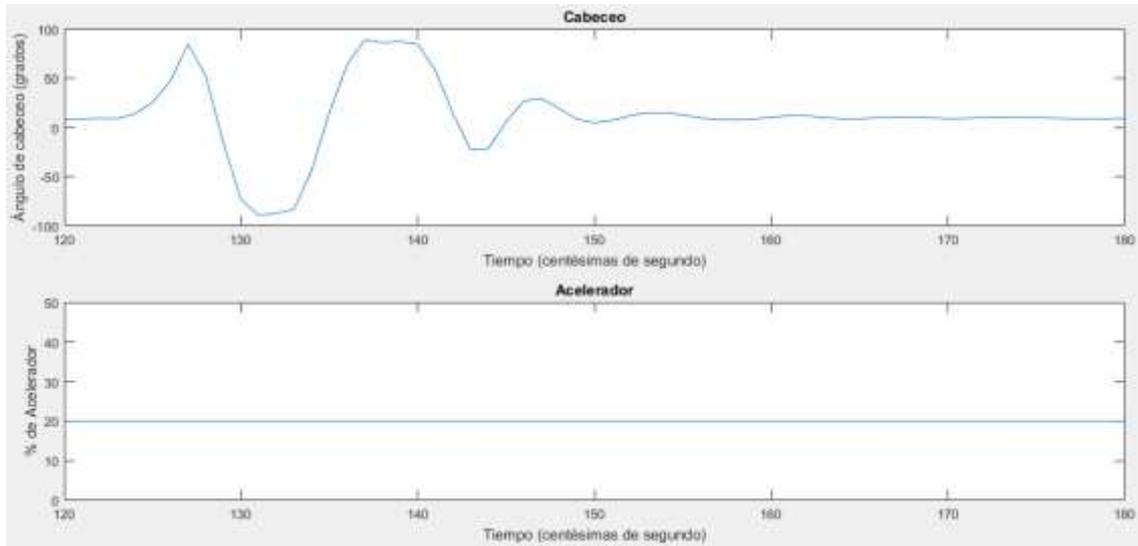


Ilustración 66: Respuesta del dron con 20% de acelerador

Los valores analíticos de la respuesta son:

- Tiempo de establecimiento (98%): 350 milisegundos
- % de sobreoscilación: 16%
- Tiempo de pico: 110 milisegundos
- Error de posición= 8,5 grados (4,7%)

Ante estas respuestas, cuyos tiempos de establecimientos son reducidos pero se tiene una sobreoscilación muy grande, se realizó una prueba en la que se modificaría el porcentaje de aceleración durante la respuesta. Este fue el resultado:

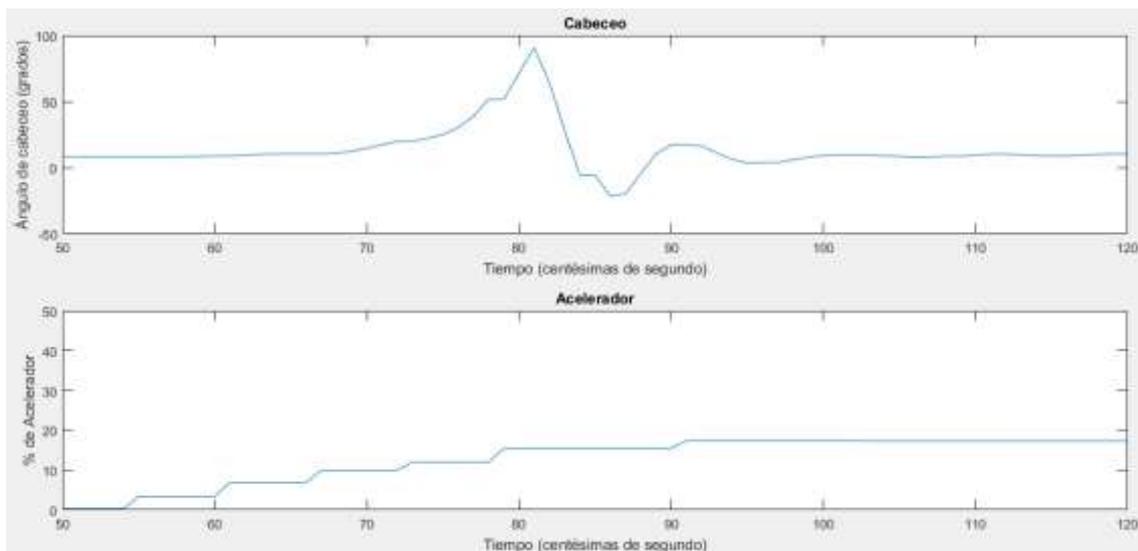


Ilustración 67: Respuesta del dron combinada

Los valores analíticos de la respuesta son:

- Tiempo de establecimiento (98%): 250 milisegundos
- % de sobreoscilación: 12%
- Tiempo de pico: 70 milisegundos
- Error de posición= 8 grados (4,47%)

Como se puede apreciar, el último de los 3 ensayos es el que menor tiempo de establecimiento, sobreoscilación, tiempo de pico y tiempo de establecimiento proporciona. Esto quiere decir que la respuesta dinámica del sistema es óptima cuando el uso de acelerador es variante y no constante.

Por último, se presenta una demostración de seguimiento de referencias de cabeceo cambiantes:

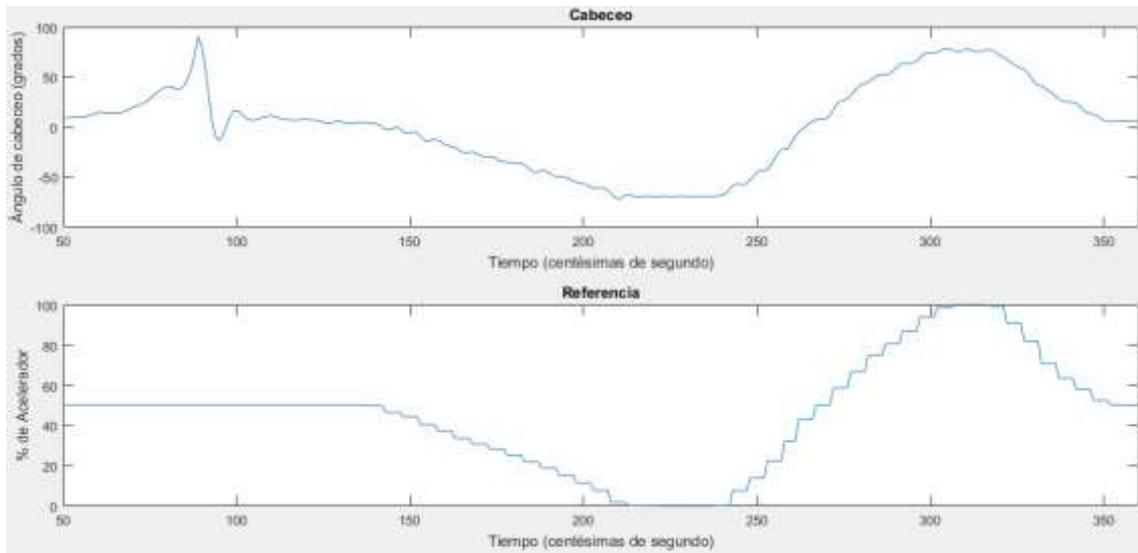


Ilustración 68: Grafica de seguimiento de referencias cambiantes

10. Conclusiones

En el presente apartado se valora el grado de realización de cada uno de los objetivos que componen el proyecto y que son mencionados al inicio de esta memoria. Dichos objetivos se corresponden con cada una de las fases del trabajo, diseño, fabricación, montaje y pruebas.

Diseño del dron:

Se ha conseguido diseñar y fabricar un dron bimotor tilt rotor funcional, cuyos actuadores funcionan correctamente y permitirán el vuelo del mismo cuando se haya realizado un control completo.

El diseño del dron se ha realizado bajo las condiciones de reducir al mínimo el peso y cumpliendo todas las particularidades: alojamiento de servos, de rodamientos, etc.

Asimismo, la superficie exterior del dron es la mínima para alojar toda la electrónica, lo que confirma que se ha realizado el diseño más ajustado a las necesidades posible.

Construcción del dron:

Gracias a la impresora CubePro Duo del DISA se ha logrado fabricar todas las piezas necesarias para ensamblar el dron. El material utilizado, PLA, así como las estructuras de panal utilizadas en los soportes de los motores, han permitido no sobrepasar los límites de peso establecidos.

Construcción de la plataforma de test:

Se ha logrado diseñar y construir una plataforma de pruebas para drones bimotores tilt rotor que ha sido utilizada para el control del cabeceo y también se puede implementar para la configuración de los reguladores para el alabeo y guiñada.

Diseño e implementación del sistema electrónico:

Se ha conseguido un sistema electrónico funcional, cuyo código se puede modificar con facilidad, compilar y lanzar de nuevo a la placa. Dicho de otra forma, se tiene un sistema de elaboración de código e implementación plenamente funcional.

En el proceso de completar este objetivo se realizaron las labores de diseño, búsqueda de componentes y configuración de los mismos.

Diseño del regulador para el control del cabeceo:

Se ha diseñado una estructura de control utilizada está basada en PID mediante ajuste experimental. Los parámetros del regulador PD para mejorar la dinámica del sistema en bucle cerrado son $K_p=1$ y $K_d=0,001$.

Prueba de dicho controlador:

Con el diseñador diseñado se consiguió seguir una referencia de cabeceo con un error de posición inferior al 5% en los ensayos más óptimos, lo que sin duda es un gran resultado.

La sobreoscilación no se ha conseguido reducir del 12%, el cual no es un valor excesivo, pero sí muy a tener en cuenta. Es necesario recalcar que la sobreoscilación en la respuesta dinámica del cabeceo se transformaría en un avance o retroceso (cambio de la situación del dron) en caso de vuelo real.

En el peor de los ensayos, el tiempo de establecimiento fue de 0,4 segundos, lo que prueba la gran rapidez del sistema. Hay que tener en cuenta que durante las pruebas la posición inicial del dron es -180 grados de cabeceo y la referencia son 0 grados. Esto quiere decir que se trata de un movimiento muy grande y muy poco común (casi imposible) durante el vuelo, donde los cambios en la referencia son mucho menores.

Se ha probado que la evolución del ángulo de cabeceo del dron sigue las referencias cambiantes emitidas desde el transmisor radiocontrol.

11. Bibliografía

En el presente y último apartado de esta memoria se hace referencia a las fuentes de información que han sido utilizadas durante el proceso de desarrollo del trabajo de fin de grado, así como durante la escritura de esta memoria.

Antecedentes:

- <http://aviacionparatodos1.blogspot.com/2016/06/los-convertoplano.html>
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Convertoplano>

Componentes:

- <https://rc-innovations.es/Motor-drones-de-carreras-Emax-RS2205-2600kv-CCW>
- <https://www.getfpv.com/lumenier-5x4x3-3-blade-propeller-set-of-4-black.html>
- <https://mobus.es/blog/esc-para-drones-para-que-sirven/>
- <http://fpvmax.com/2016/12/21/variador-electronico-esc-funciona/>

Configuración de la electrónica:

- <http://fpvmax.com/2017/07/28/protocolos-comunicacion-drones/>
- <https://github.com/mirkix/ardupilotblue>
- <https://github.com/ArduPilot/ardupilot/tree/master/ArduCopter>

Pruebas de vuelo:

- <https://docs.groundcontrol.com/en/>
- <http://ardupilot.org/plane/index.html>

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Trabajo final de grado

Diseño e implementación de una plataforma de
test para drones bimotores TILT rotor

PLANOS

Junio, 2018

Autor: José Javier Pérez Olivares

Tutor: Sergio García-Nieto Rodríguez



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Índice:

1. Introducción

En el presente documento se muestran los planos de las piezas diseñadas durante la realización del proyecto de final de grado. Todas las piezas mostradas en este documento han sido diseñadas mediante Autodesk Inventor 2015 gracias a la licencia de estudiante habilitada por la UPV.

Con el objetivo de sintetizar la información relativa a las piezas en cuestión, se ha condensado toda la información en un plano por pieza en el que se pueden apreciar diversas vistas. Al tratarse de piezas de reducido tamaño, se ha duplicado el tamaño real de 2 de los 3 cuerpos.

Previo a la presentación del plano de cada una de las piezas, se ha realizado un breve comentario de la función de la pieza.

Para tener una información completa de los planos del proyecto, éstos están en propiedad de Sergio García-Nieto, profesor de la ETSID y ETSII, miembro del DISA y del CPOH y también tutor de este TFG.

2. Chasis – página 4

Es una pieza fundamental del dron, ya que alberga gran parte de la electrónica y sirve de soporte para los servomotores. La versión definitiva fue la 2ª, ya que previamente se realizó un boceto inicial que no cumplía con las características de robustez necesarias.

3. Soporte de los motores – página 5

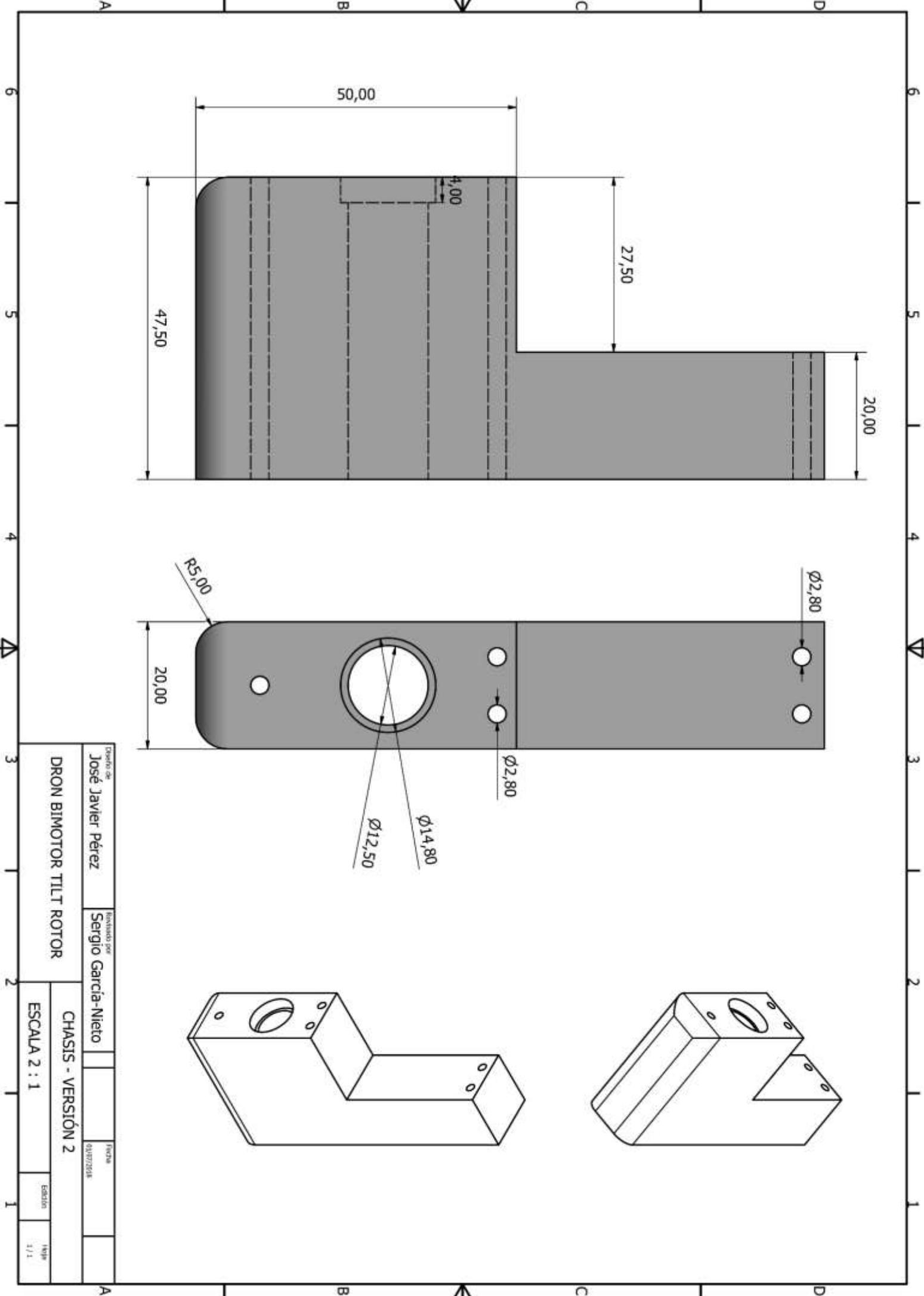
El soporte de los motores es la pieza que une los servomotores con los motores brushless que impulsarán el dron gracias a las hélices. Este soporte fue diseñado desde un inicio con la idea de que se convirtiera en el engranaje perfecto entre servo y motor, reduciendo al máximo el peso e intento que se hiciera un conjunto robusto en el que se minimizaran las vibraciones.

4. Ruedas de protección – página 6

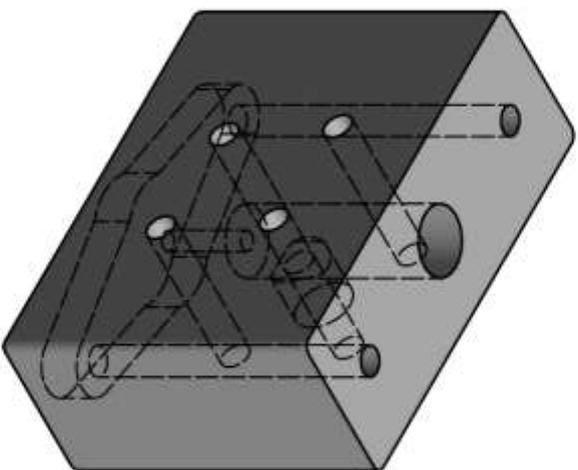
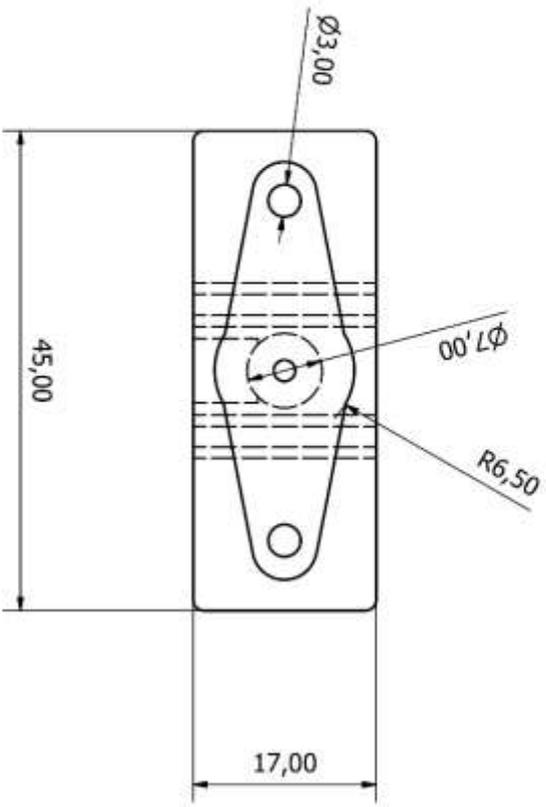
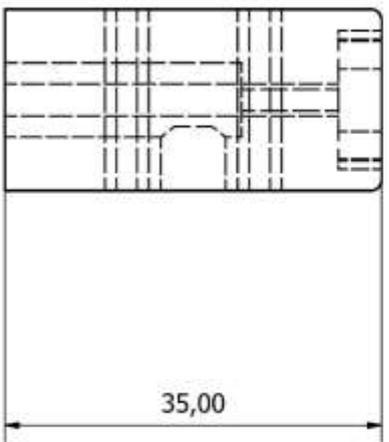
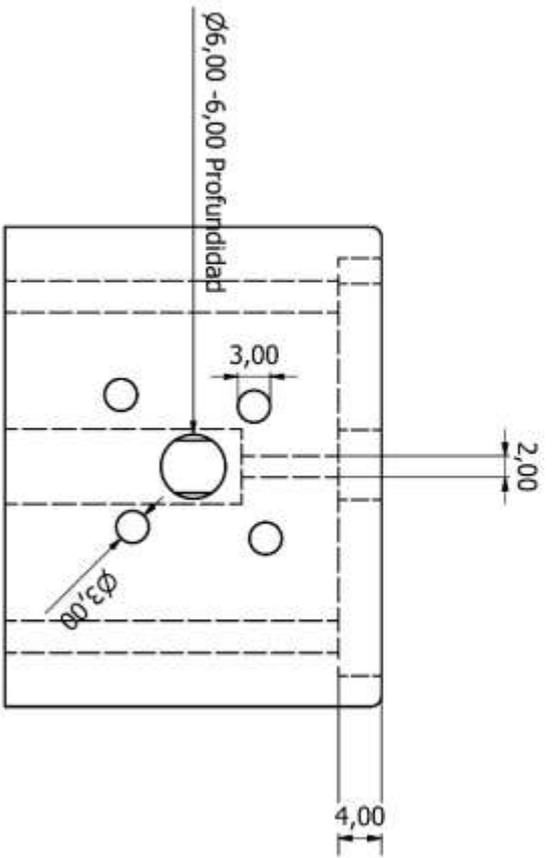
Las ruedas de protección son una parte del dron que no se ha utilizado, debido a que estas están diseñadas para proteger de impactos derivados del vuelo y esta etapa no se ha llevado a cabo. El motivo por el cual se ha diseñado y fabricado esta prueba, pese a saber desde un inicio que no se iba a utilizar, es facilitar la continuación del proyecto al próximo estudiante que siga con el control.

5. Ensamblaje – página 7

En la última página de este documento se muestra cual es la disposición geométrica de las piezas en la configuración final del dron, sin que éste esté sujeto a la plataforma y con las ruedas de protección.



Diseño de		José Javier Pérez		Revisado por		Sergio García-Nieto		Fecha		04/07/2018	
DRON BIMOTOR TILT ROTOR				CHASIS - VERSIÓN 2							
ESCALA 2 : 1				Edición		1		Hoja		1 / 1	



Confección de	Desarrollado por	Fecha	
José Javier Pérez	Enrique Carlos Mena	01/07/2018	

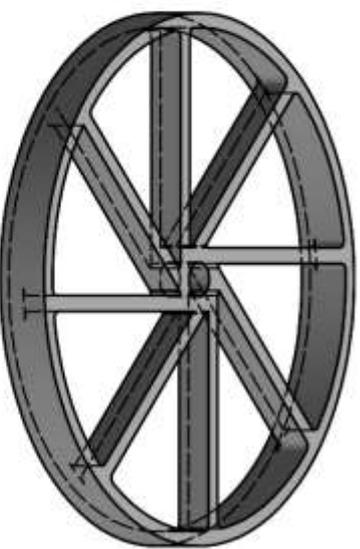
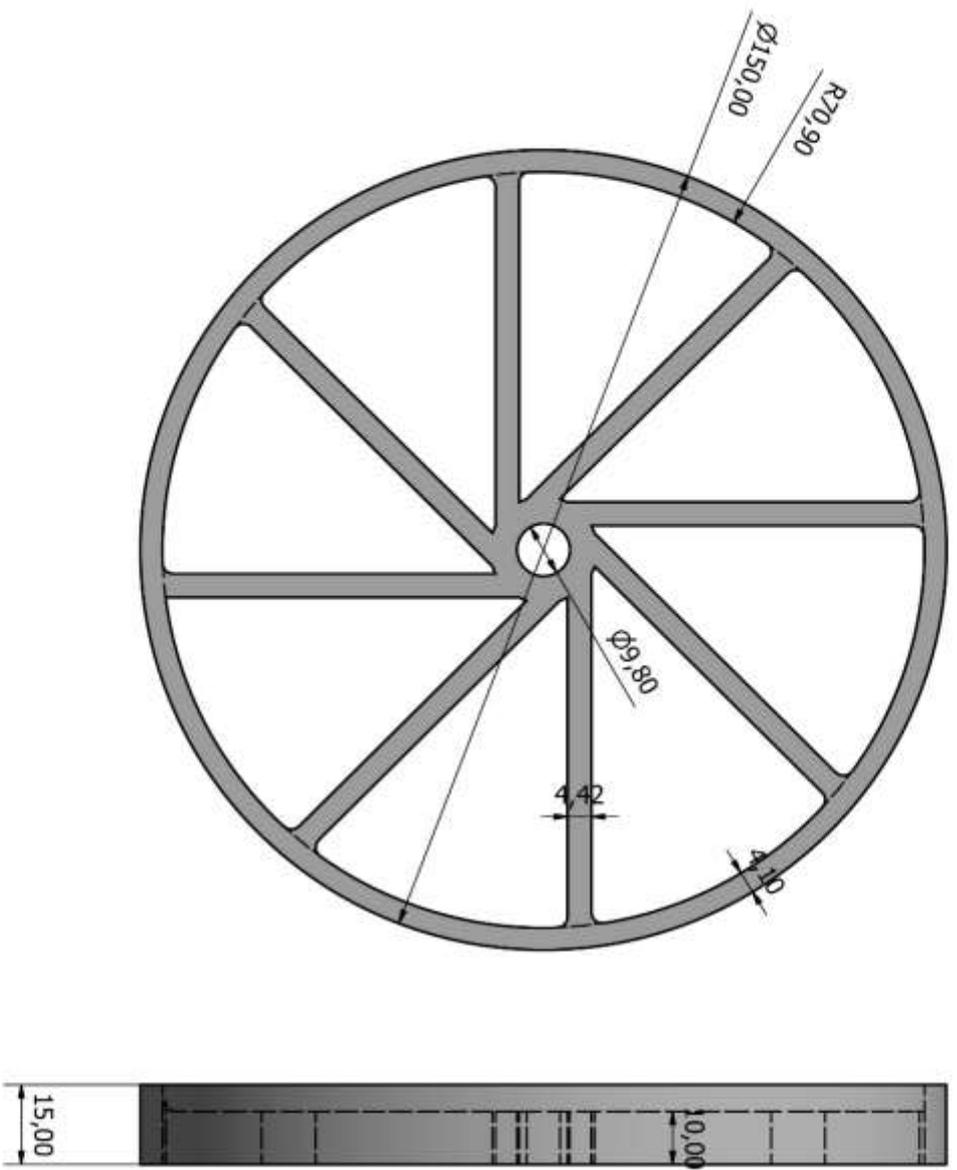
DRON BIMOTOR TILT ROTOR

SOPORTE MOTOR - VERSIÓN 3

ESCALA 2 : 1

Edición

HDP
1 / 1



Creado por
José Javier Pérez

Diseñado por
Sergio García-Nieto

Fecha
 04/07/2018

DRON BIMOTOR TILT ROTOR

RUEDAS DE PROTECCIÓN

ESCALA 1 : 1

Estado

Hoja
1 / 1

A

B

C

D

A

B

C

D

6

5

4

3

2

1

6

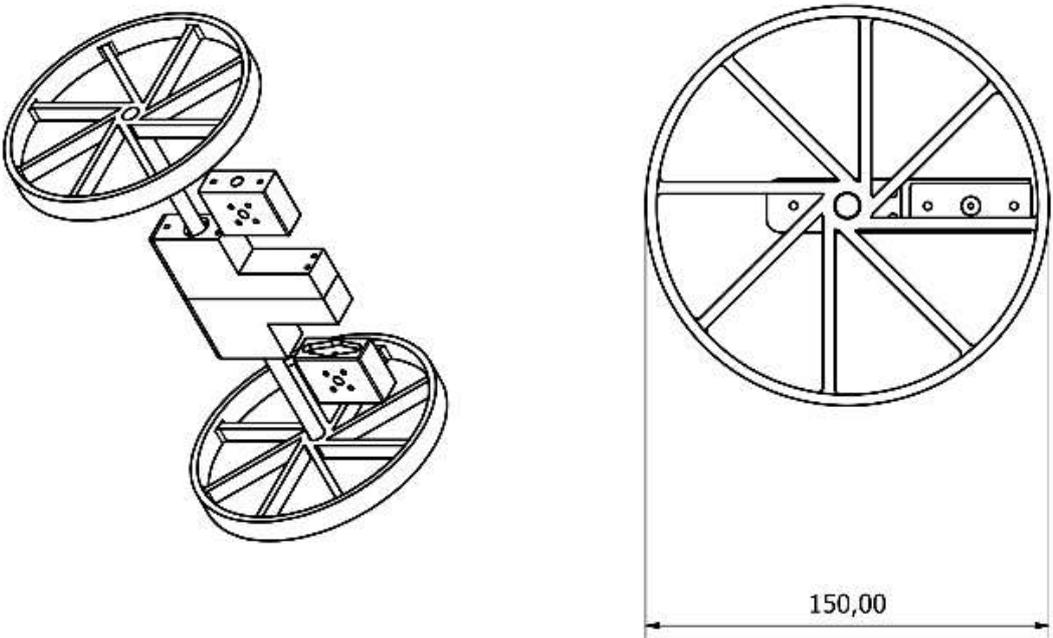
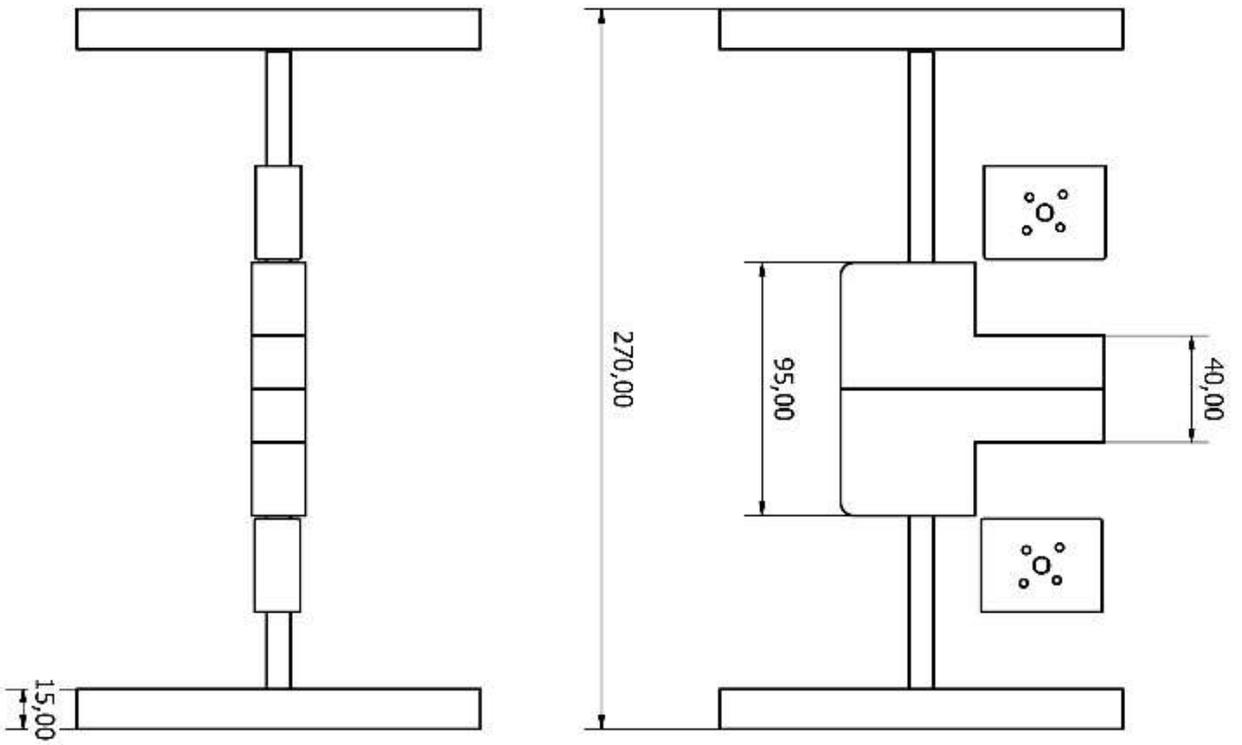
5

4

3

2

1



Diseñado por: José Javier Pérez
 Realizado por: Sergio García-Nieto
 Fecha: 20/07/2018

DRON BIMOTOR TILT ROTOR

ENSAMBLAJE FINAL

ESCALA 1 : 2

Hoja: 1
 Total: 1/1

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Trabajo final de grado

Diseño e implementación de una plataforma de
test para drones bimotores TILT rotor

PLIEGO DE CONDICIONES

Junio, 2018

Autor: José Javier Pérez Olivares

Tutor: Sergio García-Nieto Rodríguez



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

The logo of the Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, consisting of a stylized blue building icon above the text 'Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño'.

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Índice General

1: Descripción de las obras	5
1.1 Unidades de obra	5
2: Condiciones generales.....	6
2.1. Disposiciones generales	6
2.2. Condiciones generales facultativas.....	7
2.3. Condiciones generales de la ejecución.....	11
2.4. Condiciones generales económicas	14
2.5. Condiciones generales legales	18
3: Condiciones particulares	20
3.1. Condiciones técnicas particulares	20
3.2. Condiciones económicas particulares	23
3.3. Condiciones legales particulares.....	24

1: Descripción de las obras

En el siguiente pliego de condiciones se hace referencia a las especificaciones técnicas, legales y económicas para la ejecución del presente proyecto. En concreto, en este apartado se enumeran las obras a ejecutar, estando las mismas descritas con mayor detalle en los posteriores capítulos del documento.

1.1 Unidades de obra

Las obras a ejecutar pueden ser agrupadas de la siguiente forma:

- Diseño
- Fabricación
- Montaje
- Verificación
- Pruebas

1.1.1 Diseño

En esta primera unidad de obra se tratará el diseño mecánico del frame, así como la plataforma de test y también el dimensionamiento y elección de los componentes electrónicos. De esta forma, las labores que se llevarán a cabo son:

- Diseño del frame para impresión 3D
- Diseño de la plataforma de aluminio
- Diseño del sistema electrónico

1.1.2 Fabricación

La segunda unidad de obra incluirá todas las acciones relacionadas con la fabricación del frame, que será realizada íntegramente mediante impresión 3D. Asimismo, se incluirá una exhaustiva comprobación de la correcta fabricación de todas las piezas.

- Impresión 3D del frame
- Validación de la fabricación

1.1.3 Montaje

El montaje será un punto vital de la evolución del proyecto, ya que será aquí donde se ensamblará las distintas partes del dron y de la plataforma, donde se unirán ambas partes y se realizarán las conexiones electrónicas.

- Ensamblaje del frame
- Montaje de la plataforma
- Conexión de la electrónica
- Montaje final del conjunto

1.1.4 Verificación

En la cuarta unidad de obra se realizarán diferentes pruebas de resistencia y de funcionamiento de los actuadores previas a comenzar con la programación del control del dron.

- Pruebas de funcionamiento de los actuadores

1.1.5 Pruebas

La quinta y última unidad de obra estará formada por la obtención del regulador PID para el control del cabeceo y la prueba de dicho regulador.

- Obtención del regulador PID para el control del cabeceo
- Prueba del regulador diseñado

2: Condiciones generales

2.1. Disposiciones generales

La naturalidad de este apartado consiste en regular la ejecución de las obras, delimitando los derechos y deberes que corresponden al constructor, al dueño de la obra, al ingeniero y aparejador, así como las relaciones entre todos ellos. En él se recogen los aspectos legales del proyecto y se recogen las condiciones que regulan la ejecución y puesta en marcha del mismo: características de los materiales, técnicas a emplear en la ejecución, controles de calidad exigidos, normas y leyes que rigen el proyecto. Constituye la especificación de carácter facultativo, económico y legal que regirá en el desarrollo de las obras.

2.1.1 Documentación del contrato de obra

El contrato de obra se encuentra formado por los siguientes documentos:

- Condiciones fijadas en el documento de contrato.
- Pliego de condiciones técnicas particulares.
- El presente pliego general de condiciones.
- El resto de documentación del proyecto.

Las ordenes e instrucciones de la dirección de la obra se incorporan al proyecto como interpretación o precisión de este. En cada documento las especificaciones literales prevalecen sobre las gráficas y en los planos la cota prevalece sobre la medida a escala.

2.2. Condiciones generales facultativas

En este apartado se describen y regulan las relaciones entre la contrata y la dirección facultativa para la ejecución de las obras.

2.2.1. Funciones a desarrollar por el contratista

Corresponde al contratista de las obras:

- Organizar los trabajos, elaborar planos de obra que se precisen y autorizar las instalaciones provisionales y auxiliares de la obra.
- Observar la normativa vigente en cuanto a seguridad e higiene en el trabajo y velar por su cumplimiento.
- Ostentar la jefatura de todo el personal que intervenga en la obra y coordinar las intervenciones de los subcontratistas.
- Asegurar la idoneidad de todos y cada uno de los materiales utilizados, rechazando aquellos que no cuenten con las garantías exigidas por la normativa vigente o el presente pliego de condiciones.
- Poseer el libro de órdenes y seguimiento de la obra. Registrar todas las anotaciones que en él se efectúen a fin de que sean llevadas a cabo.

- Facilitar a la dirección facultativa los materiales para el cumplimiento de su cometido.
- Preparar los certificados parciales de obra y la propuesta de liquidación final.
- Suscribir con el promotor las actas de recepción provisional y definitiva.
- Concertar los seguros de accidentes de trabajo y de daños a terceros durante la obra. Derechos y obligaciones.
- Conocer las leyes y verificar los documentos del proyecto. El constructor deberá indicar que la documentación del proyecto le resulta su cliente para la comprensión de la obra o solicitar aclaraciones pertinentes.
- Elaborar el plan de seguridad e higiene para la aprobación por parte de la dirección facultativa.
- Habilitar en la obra o cinas para la consulta de planos y para los trabajos de la dirección facultativa. En dichas o cinas deberá hallarse la licencia de obras, el proyecto de ejecución completo, el libro de órdenes, el plan de seguridad e higiene, el libro de incidencias y la documentación de los seguros contratados.
- El constructor debe comunicar a la propiedad la persona designada como El jefe de obra, o sus encargados, han de estar presentes durante la jornada de trabajo y acompañar al ingeniero o aparejador en las visitas a las obras, poniéndose a disposición de éstos y suministrando los datos precisos para la comprobación de mediciones y liquidaciones.
- La contrata debe ejecutar los trabajos necesarios para la buena construcción y aspecto de las obras, aun cuando estos no se hallen expresamente determinados, siempre que lo disponga el ingeniero dentro de los límites de las posibilidades de los presupuestos. Requiere reformado del proyecto con consentimiento de la propiedad toda variación que suponga el incremento de los precios de alguna unidad de obra en más del veinte por ciento (20 %), o del total del presupuesto en un diez por ciento (10 %).
- Las aclaraciones, interpretaciones y modificaciones de los preceptos del pliego de condiciones o de las indicaciones de los planos se comunicarán por escrito al constructor, debiendo este devolver los originales comunicando el enterado mediante su firma al pie de todas las instrucciones, avisos u órdenes que reciba.

- El constructor podrá requerir del ingeniero o del aparejador o ingeniero técnico cuantas instrucciones o aclaraciones precise para la correcta ejecución del proyecto. Asimismo recibirá solución a los problemas técnicos no previstos en el proyecto que se pudieran presentar durante la ejecución de las obras.
- Las reclamaciones del contratista contra ordenes o instrucciones de la dirección facultativa las presentará ante la propiedad a través del ingeniero, si son de orden económico y de acuerdo con las condiciones estipuladas en el pliego de condiciones correspondiente. Contra disposiciones de orden técnico no podrá interponer reclamación alguna, pudiendo el contratista a fin de salvar su responsabilidad exponer razonablemente al ingeniero, el cual puede limitar su contestación al acuse de recibo.
- El contratista no podrá recusar al ingeniero, aparejador o ingeniero técnico o personal encargado por estos para el control de las obras, ni pedir la designación de otros facultativos para los reconocimientos o mediciones.
- En caso de desobediencia, manifiesta incompetencia o negligencia grave que comprometan o perturben la marcha de las obras, el ingeniero puede requerir al contratista que aparte a los operarios causantes de la perturbación.
- El contratista puede subcontratar capítulos o unidades de obra con sujeción a lo estipulado en el pliego de condiciones y sin perjuicio de sus obligaciones como contratista general de la obra.
- El contratista no iniciará una unidad de obra sin la autorización de la dirección.
- El contratista está obligado a cumplir las indicaciones del libro de órdenes.

2.2.2. Funciones a desarrollar por el ingeniero director

Es el máximo responsable de la ejecución del proyecto, decide sobre el comienzo, ritmo y calidad de los trabajos. Velar por el cumplimiento de los mismos y por las condiciones de seguridad del personal de la obra. Las funciones que corresponden al ingeniero director son:

- Redactar los complementos o rectificaciones del proyecto que se precisen.

- Asistir a las obras las veces que la naturaleza y complejidad de las mismas requieran a fin de resolver las contingencias que se produzcan e impartir las instrucciones necesarias.
- Coordinar la intervención en obra de otros técnicos.
- Aprobar certificaciones parciales de obra, la liquidación final y asesorar al promotor en el acto de la recepción.
- Preparar la documentación final de la obra, expedir y suscribir junto con el aparejador o ingeniero técnico el certificado final de la misma.
- Comprobar instalaciones provisionales, medios auxiliares y sistemas de seguridad e higiene en el trabajo.
- Ordenar y dirigir la ejecución con arreglo al proyecto, normas técnicas y reglas de la buena construcción.
- Realizar o disponer de las pruebas y ensayos de materiales, instalaciones y demás unidades de obra según el plan de control, así como los controles necesarios para asegurar la calidad constructiva de acuerdo con el proyecto y la normativa técnica aplicable.
- Informar al constructor de los resultados de las pruebas e impartir, en su caso, las órdenes oportunas.
- Planificar el control de calidad y el control económico de las obras.

2.2.3. Libro de condiciones

Es obligatoria la existencia a pie de obra de un libro de órdenes e incidencias, visado por los colegiados profesionales correspondientes donde se recogerán las órdenes y modificaciones que se dicten en cada momento.

2.3. Condiciones generales de la ejecución

2.3.1. Ritmo de las obras

El instalador o contratista iniciará las obras en el plazo marcado por el pliego de condiciones particulares, desarrollándolas para que queden ejecutados los trabajos dentro de los periodos parciales establecidos y así ejecutar la obra dentro del plazo exigido en el contrato.

El contratista dará cuenta por escrito al ingeniero del comienzo de los trabajos con, al menos, tres días de antelación.

2.3.2. Orden de los trabajos

La determinación del orden de los trabajos es facultad de la contrata, salvo en casos que por circunstancias técnicas estime conveniente su variación la dirección facultativa.

2.3.3. Ampliación del proyecto por causas imprevistas

Cuando haya que ampliar el contrato, bien por motivos imprevistos o razones de fuerza mayor, no se interrumpirán los trabajos, continuándose según las instrucciones dadas por el ingeniero en cuanto se formule o tramite el proyecto reformado. El constructor deberá realizar los trabajos necesarios de carácter urgente, anticipando ese servicio, el cual le será consignado en un presupuesto adicional o abonado directamente.

2.3.4. Prórroga por causas de fuerza mayor

Si por causas de fuerza mayor o independiente de la voluntad del constructor no pudiesen iniciarse las obras, o fuesen suspendidas o no se acabasen en los plazos prefijados, se otorgará una prórroga para el cumplimiento de la contrata previo informe favorable del ingeniero.

2.3.5. Condiciones generales de la ejecución de los trabajos

Los trabajos se ejecutarán con estricta sujeción al proyecto, a las modificaciones del mismo que hayan sido aprobadas y a las órdenes e instrucciones que entreguen por escrito bajo su responsabilidad el ingeniero o el aparejador o ingeniero técnico.

2.3.6. Trabajos defectuosos

El constructor deberá emplear materiales que cumplan con las condiciones exigidas en las condiciones técnicas generales y particulares del pliego de condiciones y realizar los trabajos de acuerdo con lo especificado en el pliego. Hasta la recepción definitiva es el responsable de la ejecución y de los defectos derivados de una mala ejecución. Por esto, cuando el aparejador o ingeniero técnico advierta defectos en los trabajos, o que los materiales o los dispositivos colocados no reúnen las condiciones exigibles, entonces antes de la recepción de la obra podrá disponer la reposición de las partes defectuosas.

2.3.7. Defectos ocultos

Si el aparejador tiene fundadas razones para creer en la existencia de defectos ocultos de construcción, ordenar efectuar antes de la recepción definitiva los ensayos que crea conveniente para reconocer los trabajos que suponga defectuosos. Pagar los ensayos el constructor si existe y la propiedad si no existe este.

2.3.8. Procedencia de materiales y aparatos

El constructor se proveerá de materiales y aparatos de todas clases en los puntos que le parezcan convenientes excepto en los casos en que el pliego de condiciones preceptúe una procedencia determinada. El constructor deberá informar al aparejador de la idoneidad y procedencia de los mismos. A petición del ingeniero, el constructor presentar muestras de los materiales.

2.3.9. Materiales defectuosos

El ingeniero a instancias del aparejador dar orden al constructor de sustituir los materiales y aparatos defectuosos por otros que satisfagan las condiciones de calidad exigidas en el presente pliego de condiciones. Si el constructor no los retirara lo hará la propiedad, cargando los gastos a la contrata.

2.3.10. Pruebas y ensayos

Los gastos ocasionados por pruebas y ensayos corren por cuenta de la contrata, pudiéndose repetir aquellos que no ofrezcan las suficientes garantías.

2.3.11. Obras sin prescripciones

En aquellos trabajos para los que no existan prescripciones en el presente pliego ni en la documentación restante, el constructor se atenderá a las instrucciones que dicte la dirección facultativa.

2.3.12. Recepción

- Recepción provisional

Tres días antes de dar fin a las obras, el ingeniero comunicará a la propiedad la proximidad de la terminación a fin de convenir la fecha para el acto de recepción provisional. Esta se realiza con la participación de la propiedad, el aparejador, el constructor y el ingeniero. Se practica un detenido reconocimiento de las obras, se extenderá un acta para cada interviniente firmada por todos ellos. Desde esta fecha corre el periodo de garantía si las obras son admitidas. Seguidamente los técnicos de la dirección facultativa extenderán el certificado de final de la obra. En caso de estar acabado se darán las instrucciones para remediar los defectos, fijando un plazo para subsanarlos, pasado el cual se hará un nuevo reconocimiento.

- Documentación final de la obra

El ingeniero director facilitará a la propiedad la documentación final con las especificaciones y contenidos dispuestos por la legislación vigente.

- Medición definitiva y liquidación provisional

Recibidas las obras, se procederá por parte del aparejador a su medición definitiva, con la existencia del constructor. Se extenderá la oportuna certificación por triplicado, que aprobada por el ingeniero con su firma servirá para el abono por parte de la propiedad del saldo resultante menos la cantidad retenida como fianza.

- Recepción definitiva

Se verificará después del plazo de garantía, el cual se especifica en el pliego de condiciones particulares y nunca será inferior a nueve meses. A partir de esta fecha cesa la obligación del constructor de reparar desperfectos propios de la normal conservación de la obra.

- Prorroga de garantía

Si la obra no se encuentra en las condiciones debidas se aplaza la recepción definitiva. El ingeniero director indicará al constructor los plazos para realizar las obras necesarias. De no cumplirse estos plazos perderá la fianza.

- Recepciones de trabajos cuya contrata ha sido rescindida

En caso de resolución del contrato, el contratista deberá retirar las herramientas, medios auxiliares, etcétera, en el plazo indicado en el pliego de condiciones y dejar la obra en condiciones de ser reanudada por otra empresa. Los trabajos terminados se recibirán provisionalmente, y definitivamente una vez transcurrido el periodo de garantía.

2.4. Condiciones generales económicas

2.4.1. Principio general

En este apartado se describen y regulan las relaciones económicas entre la propiedad y la contrata, así como la función de control de la dirección facultativa. Todos los intervinientes en el proceso de construcción tienen derecho a percibir puntualmente las cantidades devengadas por su correcta actuación con arreglo a las condiciones contractuales establecidas.

La propiedad, el contratista y los técnicos pueden exigirse recíprocamente las garantías adecuadas al cumplimiento puntual de sus obligaciones de pago.

2.4.2. Fianzas

La fianza es el porcentaje del valor total de las obras que debe depositar la contrata como garantía a la firma del contrato. El contratista presentar las siguientes fianzas:

- Depósito en metálico o aval bancario por importe del diez por ciento (10 %) del precio total de la contrata, salvo especificación contraria en el contrato.
- Retención de un cinco por ciento (5 %) en las certificaciones parciales o pagos que se van librando.

Con cargo a la fianza se aplican las penalizaciones por demoras y las reparaciones con cargo a la contrata. Si el contratista se negase a realizar los trabajos precisos para ultimar la obra en las condiciones contratadas, el ingeniero en representación del propietario ordenará su ejecución a un tercero, abonando su importe con la fianza depositada, sin perjuicio de las acciones que el propietario lleve a cabo en caso de que el importe de la fianza no cubra el importe de los gastos. La fianza será devuelta al contratista en un plazo inferior a 30 días después de firmar el acta de recepción definitiva de la obra. La propiedad podrá exigir que el contratista acredite la liquidación y finiquito de sus deudas causadas por la ejecución de la misma.

2.4.3 Precios

Composición de los precios:

El cálculo de los precios es el resultado de sumar los costes directos, los indirectos, los gastos generales y el beneficio industrial.

Los costes directos son:

- Mano de obra con pluses, cargas y seguros sociales que intervienen directamente.
- Los materiales a los precios resultantes a pie de obra que sean necesarios para su ejecución.
- Equipos y sistemas técnicos de seguridad e higiene para prevención y protección de accidentes.
- Gastos de personal, combustible y energía derivados del funcionamiento de la maquinaria e instalaciones utilizadas en la ejecución de la unidad de obra.

Los costes indirectos son:

- Gastos de instalación de oficinas a pie de obra, comunicaciones, edificación de almacenes, talleres, seguros, personal administrativo adscrito a la obra. Se cifran como porcentaje de los costes directos e indirectos.

El beneficio industrial:

- El beneficio del contratista se establece en un seis por ciento (6 %) sobre la suma de las anteriores partidas.
- Precio de ejecución material.
- El resultado obtenido por la suma de las anteriores partidas exceptuando el beneficio industrial.

El precio de contrata:

Es la suma de costes directos, indirectos y beneficio industrial. El IVA se aplica a este precio pero no lo integra.

Precios contradictorios

Se producen cuando la propiedad mediante el ingeniero introduce unidades o cambios de calidad en algunas de las unidades previstas o bien es necesario afrontar situaciones imprevistas. El contratista está obligado a efectuar los cambios. El precio se resolverá entre el contratista y el ingeniero antes de comenzar la ejecución de los trabajos. Si el contratista no reclama los precios antes de la firma del contrato, no podrá reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro de presupuesto que sirve de base para la ejecución.

Revisión de precios contratados

No se admite la revisión de los precios si el incremento de los mismos en las unidades que faltan por realizar no alcanza un montante superior al tres por ciento (3 %) del valor total del presupuesto del contrato. Ante variaciones al alza se efectuará la revisión del acuerdo con la fórmula establecida en el pliego de condiciones particulares. El contratista percibe la diferencia que resulte por variación del IPC superior al tres por ciento (3 %).

Se aplicará alguna de las fórmulas de revisión propuestas en la Ley de Contratos del Estado.

2.4.4. Valoración de los trabajos

Formas de abono

Salvo indicación contraria en el pliego de condiciones particulares, el abono de los trabajos se efectuará de una de las siguientes formas:

- Tipo fijo tanto alzado por unidad de obra, con el precio invariable fijado de antemano, pudiendo variar únicamente el número de unidades ejecutadas previa medición y aplicando al total de unidades de obra ejecutadas el precio fijado.
- Tanto variable por unidad de obra, según las condiciones en que se realice y los materiales empleados en su ejecución de acuerdo con las órdenes del ingeniero director.
- Mediante listas de jornales y recibos de materiales realizados en la forma que el pliego general de condiciones económicas determina.
- Por hora de trabajo según las condiciones determinadas en el contrato.

Certificaciones

En cada fecha que se indique en el contrato o en los pliegos de condiciones particulares, el contratista formará una relación valorada de las obras ejecutadas durante los plazos según las mediciones efectuadas por el aparejador.

El contratista puede presenciar las mediciones necesarias para la elaboración de la relación, as mismo, el aparejador o ingeniero técnico enviar al contratista los resultados de las mediciones para que este los examine y los devuelva firmados con su conformidad o efectuar las oportunas reclamaciones. El ingeniero aceptará o rechazará las reclamaciones dando cuenta al contratista de su resolución, pudiendo este reclamar al propietario contra la resolución del ingeniero.

A partir de la relación valorada, el ingeniero expedirá la certificación de obras ejecutadas. La certificación se remitirá al propietario en el periodo de un mes posterior

al que hace referencia la certificación y tendrá el carácter de documento sujeto a variaciones derivadas de la liquidación final, no suponiendo dichas certificaciones aprobación ni recepción de las obras que comprenden.

Mejora de obras

Cuando el contratista, incluso con la autorización del ingeniero director, emplee materiales de mayor calidad, fábrica de mayor precio u obra de mayores dimensiones únicamente tendrá derecho a percibir lo que le corresponde en caso de haber construido la obra con sujeción a lo proyectado o adjudicado.

Pagos

Los pagos los efectuará el propietario en los plazos previamente establecidos y su importe corresponderá al de las certificaciones de obra conformadas por el ingeniero director.

Trabajos ejecutados durante el periodo de garantía

El abono de estos trabajos se procederá de la siguiente forma:

- Si los trabajos están especificados en el proyecto y no fueron realizados a su debido tiempo, estos serán valorados a los precios que figuren en el presupuesto y abonados de acuerdo a lo establecido en el proyecto.
- Si los trabajos tienen como objetivo la reparación de desperfectos ocasionados por el uso, estos se abonarán a los precios del día previamente acordados.
- Si el objeto de los trabajos es la reparación de desperfectos ocasionados por deficiencias de la instalación o de la calidad de los materiales, no se abonará nada al contratista.

2.4.5. Penalizaciones

Existen 3 tipos de penalizaciones: por demora en la ejecución, por incumplimiento de contrato y por demora de pagos.

Por retraso no justificado en el plazo de terminación:

La indemnización por retraso no justificado en la terminación de las obras se establecerá en un cinco por ciento (5 %) del importe total de los trabajos contratados por día natural de retraso a partir del día de terminación fijado. Esta cantidad será descontada y retenida con cargo a la fianza. No se computan como días perdidos los debidos a razones de fuerza mayor como huelgas, catástrofes o causas administrativas.

Penalización por incumplimiento de contrato:

Se establecer en las condiciones del contrato una penalización por incumplimiento de contrato o mala ejecución de los trabajos.

Demora en los pagos:

Si el propietario no efectuase el pago dentro del mes siguiente al plazo convenido, el contratista tendrá el derecho de percibir el abono de un cuatro y medio por ciento anual (4,5 %) en concepto de intereses de demora. Si pasasen dos meses a partir del término de dicho plazo, el contratista tiene derecho a la resolución del contrato, precediéndose a la liquidación de las obras ejecutadas y materiales acopiados.

2.5. Condiciones generales legales

Ambas partes se comprometen en sus diferencias al arbitrio de amigables componedores.

2.5.1. El contratista

El contratista es el responsable de la ejecución de las obras en las condiciones establecidas en el contrato y en los documentos del proyecto excluida la memoria. Por tanto está obligado a deshacer y volver a hacer todo lo mal ejecutado durante las obras aunque estas partidas hayan sido abonadas. Asimismo, se obliga a lo establecido en la ley de contratos de trabajo y dispuesto en la de accidentes de trabajo, subsidio familiar y seguros sociales.

El contratista se responsabiliza de los accidentes que se produzcan por inexperiencia o descuido donde se efectúan las obras y en las contiguas. Será el único responsable y correrá de su cuenta el abono de las indemnizaciones puesto que se excluyen en los precios los gastos para seguros y medidas de seguridad.

Corre a cargo de la contrata el pago de impuestos y arbitrios municipales cuyo abono deba efectuarse durante el tiempo de ejecución de las obras y por concepto inherente a las obras.

El contratista tiene derecho, a su costa, de sacar copias de planos, presupuestos, pliego de condiciones y demás documentos del proyecto.

Serán causas de rescisión del contrato:

- Muerte o incapacidad del contratista.

- La quiebra del contratista.
- Alteraciones del contrato por:
 - Modificaciones del proyecto con alteraciones fundamentales a juicio del ingeniero director, y siempre que alguna modificación represente como mínimo el cuarenta por ciento (40 %) del valor de alguna de las unidades del proyecto modificadas.
 - Modificación de las unidades de obra, siempre que representen el cuarenta por ciento (40 %) como mínimo de alguna de las unidades modificadas.
 - La suspensión de la obra comenzada y el no comienzo de las obras en tres (3) meses a partir de la adjudicación. Se procederá a devolver la fianza.
 - No comenzar los trabajos dentro del plazo señalado en las condiciones del contrato o del proyecto.
 - El incumplimiento de las condiciones del contrato cuando suponga descuido o mala fe con perjuicio de los intereses de la obra.
 - El abandono de la obra sin causa justificada.

2.5.2. El contrato

El contrato se establece entre la propiedad o promotor y el contratista. Existen varias modalidades:

- A precio alzado: se estipula una cantidad para las obras que no se modificará aunque el volumen de las obras se modifique.
- Contrato por unidades de obra.

2.5.3. Arbitraje

En casos de litigio o desavenencia entre la propiedad y la contrata se recurrirá en primer lugar a la dirección facultativa de la obra. En caso que el desacuerdo subsista, cada parte nombrará un perito, sometiéndose las partes al acuerdo entre éstos. En última instancia se acudirá a los tribunales.

3: Condiciones particulares

En el presente capítulo se especificaran las condiciones técnicas, económicas y legales de carácter particular a las que se ha de someter el proyecto.

3.1. Condiciones técnicas particulares

Son objeto de la especificación las características que han de tener los materiales necesarios, los controles de calidad, así como las pruebas y ensayos a las que se verán sometidos.

La organización de este apartado se realizar en base al orden cronológico en el que se deberán ejecutar los diferentes grupos de unidades de obra. Por tanto, para la realización de cada grupo de unidades de obra descrito es necesario que antes hayan sido realizadas todas las unidades de obra descritas anteriormente. En base a este criterio, las obras se organizan como se muestra a continuación:

Unidad de obra 1: Diseño

- Diseño del frame para impresión 3D
- Diseño de la plataforma de aluminio
- Diseño del sistema electrónico

Unidad de obra 2: Fabricación

- Impresión 3D del frame
- Acabados con el torno
- Validación de la fabricación

Unidad de obra 3: Montaje

- Ensamblaje del frame
- Montaje de la plataforma
- Conexión de la electrónica
- Montaje final del conjunto

Unidad de obra 4: Validación

- Pruebas de funcionamiento de los actuadores

Unidad de obra 5: Control/Configuración

- Obtención del regulador PID para el control del cabeceo
- Prueba del regulador diseñado

3.1.1 Diseño

Se deberán llevar a cabo todas las obras referentes al diseño mediante CAD de un frame que posteriormente será impreso en 3D, así como de una plataforma de test para drones bimotores tilt rotor como el diseñado. Del mismo modo, se diseñará el sistema electrónico/informático y se escogerán los elementos que formarán el hardware.

A continuación se describen con detalle las condiciones de los materiales y de ejecución de las unidades de obra asociadas a cada grupo:

- Frame:

El chasis estará formado por 2 piezas idénticas que serán unidas mediante 3 varillas roscadas para formar el cuerpo principal del dron. Dicho chasis estará complementado por 2 soportes de sujeción de los motores que convertirán el giro de los servos en rotaciones de los ejes de los motores.

El conjunto del chasis será fabricado mediante la técnica de impresión 3D y su peso deberá ser inferior a 100 gramos.

El chasis deberá poder alojar 2 rodamientos que servirán para facilitar la rotación del dron sobre la barra que unirá éste a la plataforma de test.

El dron deberá poder soportar toda la electrónica, sin ser sensible a la temperatura de los componentes y a las vibraciones de los mismos durante su funcionamiento.

- Plataforma de aluminio:

La plataforma de test para drones tilt rotor tiene como única limitación soportar los movimientos del dron sin verse afectada ninguna característica de su estructura y disposición.

Será necesario que el coste de la plataforma sea inferior a 30€ y que su estructura sea lo más sencilla posible, es decir, que cuente con el menor número de partes.

- Electrónica:

El conjunto de componentes electrónicos del dron harían posible el futuro vuelo estable del objeto volador. Por ello, es vital un correcto dimensionamiento de las características de los motores, así como de la batería. La elección de la controladora de vuelo, así como otros componentes no será un problema, ya que el peso de estos elementos es muy reducido y no suponen un problema para el comportamiento del dron.

Será necesario crear un modo de vuelo nuevo a partir de la estructura ArduPilot para implementar el nuevo sistema de control.

3.1.2. Fabricación

Tras las labores de diseño del dron y la plataforma de test, será necesario iniciar el periodo de fabricación.

- Impresión 3D:

Todas las partes que conforman el chasis del dron serán fabricadas mediante la técnica de impresión 3D. Para ello, se hará uso de 2 impresoras propiedad del DISA: una Da Vinci y una CubePro Duo. Para reducir el peso de la estructura, ninguna de las piezas será maciza, sino que tendrán un entramado interno en forma de panal de abeja (honeycomb).

- Torno

Se hará uso del torno para pulir pequeños defectos de la impresión o mejorar algunos acabados de las piezas.

- Validación de la fabricación

La última etapa de la unidad de obra 2 será la comprobación de la correcta fabricación (dimensiones y peso) de todas las piezas que han formado parte del proceso de impresión.

3.1.3. Montaje

La tercera unidad de obra de este proyecto estará formada por las labores de ensamblaje de las diferentes partes del dron y la plataforma de test.

- Ensamblaje del frame

Para ensamblar el conjunto de piezas que forman el dron se utilizará varilla roscada de 3mm de diámetro y otras herramientas para no dejar ningún tipo de residuo en el cuerpo del aparato.

El montaje final debe ser rígido y sin ningún tipo de holgura entre las diferentes partes que lo conforman.

- Montaje de la plataforma

Para el montaje de la plataforma se hará uso de tornillos y otras herramientas para no dejar ningún tipo de residuo en el cuerpo del aparato.

El montaje final debe ser rígido y sin ningún tipo de holgura entre las diferentes partes que lo conforman.

- Conexión de la electrónica

Para atacar el problema de incluir la electrónica en el conjunto se optará por un diseño modular, en el que las piezas puedan ser sustituidas con facilidad, ya que esta es la parte más susceptible de cambios. Por ello, se utilizará un objeto común como el velcro para sujetar los distintos elementos electrónicos a las superficies del cuerpo del dron.

El montaje final debe ser rígido y sin ningún tipo de holgura entre las diferentes partes que lo conforman

- Montaje del conjunto

Esta última acción de la tercera unidad de obra significará unir todas las diferentes partes como un solo cuerpo. El resultado será una plataforma de test con un dron bimotor tilt rotor plenamente funcional y lista para la estabilización del cabeceo.

3.1.4. Validación

La cuarta unidad de obra incluirá las labores de prueba del correcto funcionamiento de todos y cada uno de los actuadores y elementos electrónicos que forman el conjunto.

Para la realización de esta tarea se hará uso de:

- Multímetro para comprobar el correcto funcionamiento del regulador de potencia de los motores.
- Emisora Fly Sky y ArduPlane para comprobar los 2 servomotores y los 2 motores brushless en modo manual.
- Osciloscopio para comprobar el correcto funcionamiento del acelerómetro de la placa Beagle Bone Blue.

3.1.5. Control/Configuración

La quinta y última unidad de obra será la encargada de establecer una nueva estrategia de control que inicialmente servirá para controlar el cabeceo y en un futuro podría ser ampliada a otros movimientos del dron.

Será necesario crear una función con el nombre "stabilice_cpoh" en la que se realizarán las modificaciones y las pruebas con el objetivo de mantener intacto el resto del código.

3.2. Condiciones económicas particulares

La duración del contrato será de un año. El pago al contratista se realizará en cuatro plazos. El primero se efectuará en el momento de la firma del contrato y su cuantía será del cuarenta por ciento (40 %) del precio fijado para la realización del proyecto.

El segundo y tercer pago se abonarán en el cuarto y octavo mes respectivamente, contados desde la fecha del primer pago. La cuantía a abonar en cada caso será el veinte por ciento (20 %) del precio total fijado.

El último pago se formalizará tres meses después de la expiración del contrato. Se deberá abonar el veinte por ciento (20 %) restante del precio total. Este último abono en diferido supondrá una garantía al promotor del proyecto en el caso de que una vez finalizado el contrato se detecten errores de fabricación del producto.

3.3. Condiciones legales particulares

3.3.1. Perfil del contratista

Para que el contratista pueda optar a la adjudicación del contrato del presente proyecto, deberá satisfacer, además de lo expuesto en el apartado uno, los siguientes requisitos mínimos:

- El precio propuesto por el contratista no deberá superar en ningún caso el veinte por ciento (20 %) de la cantidad indicada en el documento "Presupuesto.
- Deberá contar, como mínimo, un graduado en ingeniería electrónica industrial y automática o ingeniería aeroespacial.

Asimismo, se valorará positivamente el programa social de la empresa especialmente en los puntos concretados a continuación:

Participación de la empresa en programas de becas de prácticas de formación para alumnos de grados universitarios o ciclos formativos, así como para alumnos recién titulados.

Disposición de un certificado de sostenibilidad medioambiental.

3.3.2. Criterios de adjudicación

La adjudicación del contrato se regirá por los criterios especificados en apartado 3.1.

El contrato se adjudicará a la oferta que presente la puntuación más elevada, la cual será computada con la suma de los puntos obtenidos para cada concepto.

Concepto	Puntuación
Precio	Precio mínimo ofertado: 60 Segundo precio mínimo: 45 Tercer precio mínimo: 15 Superiores al precio máximo: 0
Años de experiencia en diseño CAD	Más de 10 años: 40 Entre 5 y 9 años: 30 Entre 1 y 4 años: 15 Inferior a 1 año: 5
Años de experiencia en control de cuatrirotores	Más de 10 años: 40 Entre 5 y 9 años: 30 Entre 1 y 4 años: 15 Inferior a 1 año: 5
Programa social de la empresa	Cumple todos los puntos: 10 Cumple 2 puntos: 3 Cumple 1 punto: 2 No cumple puntos: 0

3.3.3 Plazo de pruebas

El contratista dispone de un plazo máximo de sesenta (60) días hábiles, contados a partir del día siguiente al de la formalización de contrato, para adaptar sus instalaciones a la ejecución del proyecto y fabricar como mínimo un total cinco (5) unidades del producto. En ese momento, la Dirección Facultativa realizará un exhaustivo control de calidad sobre las unidades en el que se evaluará el cumplimiento de todas las especificaciones técnicas presentadas en el apartado 3.1.

Si el resultado del control no es favorable, el contratista dispondrá de un plazo adicional de treinta (30) días hábiles, contados a partir de la entrega de los resultados de la prueba, para corregir aquellos problemas detectados y fabricar como mínimo un total de cinco (5) unidades del producto. Las mismas, serán nuevamente examinadas por la Dirección Facultativa. En el supuesto de unos resultados nuevamente desfavorable, la Dirección Facultativa se reserva el derecho a rescindir el contrato acordado con el contratista.

Si los resultados del control son favorables, el plazo de pruebas se dará por finalizado y se iniciará con normalidad la ejecución de las obras. Los plazos de finalización y entrega serán siempre superiores a 90 días y se comunicarán por escrito al constructor, debiendo este devolver los originales comunicando el enterado mediante su firma al pie de todas las instrucciones, avisos u órdenes que reciba.

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Trabajo final de grado

Diseño e implementación de una plataforma de
test para drones bimotores TILT rotor

PRESUPUESTO

Junio, 2018

Autor: José Javier Pérez Olivares

Tutor: Sergio García-Nieto Rodríguez



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Índice del presupuesto:

1. Introducción.....	5
2. Mano de obra	6
3. Precios de los materiales.....	6
4. Precios de la maquinaria	8
5. Precios unitarios.....	8
6. Precios descompuestos.....	9
6.1. Cálculo de horas por tarea	9
6.2. Precios descompuestos	10
7. Presupuesto parcial.....	13
8. Presupuesto de ejecución material, de inversión y de licitación	14

Índice de tablas:

Tabla 1: Mano de obra	6
Tabla 2: Materiales impresos en 3D.....	7
Tabla 3: Resto de materiales.....	7
Tabla 4: Precios de la maquinaria	8
Tabla 5: Presupuesto parcial del Diseño	8
Tabla 6: Presupuesto parcial de Fabricación.....	8
Tabla 7: Presupuesto parcial de montaje.....	9
Tabla 8: Presupuesto parcial de Validación	9
Tabla 9: Presupuesto parcial de Configuración y Control.....	9
Tabla 10: Horas de Diseño.....	9
Tabla 11: Horas de Fabricación	10
Tabla 12: Horas de Montaje	10
Tabla 13: Horas de Validación.....	10
Tabla 14: Horas de Pruebas.....	10
Tabla 15: Precio descompuesto del Diseño del frame.....	10
Tabla 16: Precio descompuesto del Diseño de la plataforma.....	11
Tabla 17: Precio descompuesto del Diseño de la electrónica	11
Tabla 18: Precio descompuesto del Montaje del frame	11
Tabla 19: Precio descompuesto del Montaje de la plataforma	11
Tabla 20: Precio descompuesto de la Conexión de la electrónica.....	11
Tabla 21: Precio descompuesto del Montaje del conjunto	11
Tabla 22: Precio descompuesto de la Impresión 3D.....	12
Tabla 23: Precio descompuesto del Torno.....	12
Tabla 24: Precio descompuesto de la Validación de la fabricación	12
Tabla 25: Precio descompuesto de la validación de los actuadores.....	12
Tabla 26: Precio descompuesto de la configuración del sistema	12
Tabla 27: Precio descompuesto del Control	13
Tabla 28: Presupuesto parcial del diseño.....	13
Tabla 29: Presupuesto parcial de la fabricación.....	13
Tabla 30: Presupuesto parcial del Montaje.....	13
Tabla 31: Presupuesto parcial de la validación de actuadores	13
Tabla 32: Presupuesto parcial de la configuración y control	14
Tabla 33: PRESUPUESTO FINAL	14

1. Introducción

El presente presupuesto tiene como objetivo brindar toda la información detallada de los costes que suponen la ejecución del proyecto “Diseño e implementación de una plataforma de test para drones bimotores TILT rotor”. Por tanto, en este documento se incluirá el coste de diseño, fabricación, montaje, validación y pruebas, que son las 5 unidades de obra que compondrán el presupuesto.

Unidad de obra 1: Diseño

- Diseño del frame para impresión 3D
- Diseño de la plataforma de aluminio
- Diseño del sistema electrónico

Unidad de obra 2: Fabricación

- Impresión 3D del frame
- Validación de la fabricación

Unidad de obra 3: Montaje

- Ensamblaje del frame
- Montaje de la plataforma
- Conexión de la electrónica
- Montaje final del conjunto

Unidad de obra 4: Validación

- Pruebas de funcionamiento de los actuadores

Unidad de obra 5: Control/Configuración

- Obtención del regulador PID para el control del cabeceo
- Prueba del regulador diseñado

Para cada una de las unidades de obra se calcularán todos sus costes, tanto de material y maquinaria como de personal, y se especificará un coste unitario por unidad de obra. Asimismo, al final presupuesto se adjunta un resumen de los costes directos generados por el proyecto, el beneficio industrial y los impuestos.

Durante todo el presente documento, los tiempos de trabajo serán expresados en horas y la unidad monetaria será el euro (€).

2. Mano de obra

En este apartado se pretende hallar el coste generado por la contratación de empleados para la realización del proyecto. La ejecución del mismo requerirá de la mano de obra de un (1) ingeniero técnico industrial especializado en electrónica y automática. Excepcionalmente, se incorporará un (1) operario más algunas unidades de obra en concreto, por lo que su coste figura exclusivamente en dichas unidades de obra.

Además del sueldo en bruto que cobra una persona es necesario tener en cuenta el coste de la cotización a la seguridad social que se va a realizar.

Código	Tipo empleado	Salario bruto (€/mes)	h/día	días/mes	Salario (€/h)
ING	Ingeniero técnico	2500	8	22	14,20455
OPR	Operario	1500	8	22	8,522727

Tabla 1: Mano de obra

3. Precios de los materiales

En este apartado se presenta un completo cuadro en el que se detallan los precios de los materiales. Se expone el coste derivado de la compra de dichos materiales, de la amortización de los bienes ya adquiridos y de la adquisición de licencias de programas informáticos necesarias para la realización del proyecto.

Para facilitar el cálculo del coste de los materiales, se ha dividido el cálculo en 2 partes: la primera de ellas suma el coste de las horas de impresión para cada una de las piezas que fueron impresas, mientras que la segunda hace referencia al coste del resto de materiales. Por último, se suman ambas partes y se obtiene el precio final de los materiales.

Coste de las piezas impresas en 3D:

Código	Material	Horas de impresión (h)	Precio h impresión (€)	ud	Coste Total (€)
MF.1	Chasis central	8	1	2	16
MF.2	Soporte Motores	3	1	8	24
MF.3	Rueda de protección	6	1	2	12
Subtotal					52

Tabla 2: Materiales impresos en 3D

Coste del resto de materiales:

Código	Material	Precio ud (€)	ud	Coste Total (€)
MF.4	Varilla Fibra de carbono	15,9	1	15,9
MF.5	Motor	45	2	90
MF.6	Servomotor	8,9	3	26,7
MF.7	Hélice	3,25	2	6,5
MF.8	Batería	22,5	1	22,5
MF.9	ESC	47,5	2	95
MF.10	Controladora	12,5	1	12,5
MF.11	Beagle Bone Blue	82,51	1	82,51
MF.12	Emisora	99	1	99
MF.13	Receptor	20	1	20
MF.14	Cables de potencia	2,6	1	2,6
MF.15	Rodamiento	4,24	2	8,48
MF.16	Varilla roscada	2	1	2
MF.17	Tuerca d3mm	0,05	10	0,5
MF.18	Tira Velcro 1m	2,5	1	2,5
MF.19	Barra pegamento térmico	50	1	50
MP.1	Aglomerado	3,25	1	3,25
MP.2	Columnas hierro	8,5	2	17
MP.3	Tornillos d10mm	0,55	2	1,1
MP.4	Varilla aluminio	8	1	8
Subtotal				566,04

Tabla 3: Resto de materiales

De esta forma se obtiene que el coste definitivo de los materiales es igual al coste de las piezas impresas más el coste del resto de materiales, lo que es igual a **618,04€**.

4. Precios de la maquinaria

En este apartado se presenta el cuadro de precios de la maquinaria, en el cual se indica el coste de toda la maquinaria que sería preciso adquirir para llevar a cabo el proyecto.

Código	Maquinaria	Precio (€/ud)	ud	Coste total (€)
MAQ.0	Ordenador Portátil: HP Envy 15	839	1	839
MAQ.1	Licencia Autodesk Inventor	2553,1	1	2553,1
MAQ.2	Impresora 3D: Cube Pro Duo	4132,23	1	4132,23
MAQ.3	Torno	2688,95	1	2688,95
MAQ.4	Soldadura	120	1	120
			Total	10333,28

Tabla 4: Precios de la maquinaria

5. Precios unitarios

En este capítulo se proporcionan los cálculos totales de los costes del proyecto expresado en función de cada unidad de obra. Dichos cálculos se encuentran desarrollados en profundidad en apartados posteriores en función de los gastos de maquinaria, mano de obra y materiales.

5.1. Presupuesto parcial del diseño

Unidad de obra	Precio
Diseño del frame	3405,680946
Diseño plataforma	71,02272727
Diseño de electrónica	170,5367372
Subtotal	3647,240411

Tabla 5: Presupuesto parcial del Diseño

5.2. Presupuesto parcial de la fabricación

Unidad de obra	Precio
Impresión 3D	431,1942964
Torno	34,09090909
Validación	28,40909091
Subtotal	493,6942964

Tabla 6: Presupuesto parcial de Fabricación

5.3. Presupuesto parcial del montaje

Unidad de obra	Precio
Ensamblaje del frame	426,1363636
Montaje plataforma	42,61363636
Conexión electrónica	255,6818182
Montaje del conjunto	570,8845455
Subtotal	1295,316364

Tabla 7: Presupuesto parcial de montaje

5.4. Presupuesto parcial de la validación

Unidad de obra	Precio
Validación actuadores	56,81818182
Subtotal	56,81818182

Tabla 8: Presupuesto parcial de Validación

5.5. Presupuesto parcial de la configuración y control

Unidad de obra	Precio
Configuración del sistema	1054,193686
Control	426,3418431
Subtotal	1480,535529

Tabla 9: Presupuesto parcial de Configuración y Control

6. Precios descompuestos

Para estimar el coste que supone cada una de las tareas, es necesario realizar un desglose de las horas empleadas por el personal. En este apartado se dividen las diferentes unidades de obra en subtareas y se calcula el número de horas requeridas para llevar a cabo cada una de ellas.

6.1. Cálculo de horas por tarea

- - Diseño

Tareas	Días	Horas dedicadas
Diseño CAD frame	15	60
Diseño plataforma	1	5
Diseño electrónica	3	12
Total		77

Tabla 10: Horas de Diseño

- Fabricación

Tareas	Días	Horas dedicadas
Impresión 3D	6	40
Torno	3	4
Validación	1	2
Total		46

Tabla 11: Horas de Fabricación

- Montaje

Tareas	Días	Horas dedicadas
Ensamblaje frame	6	50
Montaje plataforma	2	5
Conexion electrónica	6	30
Montaje conjunto	5	20
Total		105

Tabla 12: Horas de Montaje

- Validación

Tareas	Días	Horas dedicadas
Pruebas actuadores	2	4
Total		4

Tabla 13: Horas de Validación

- Pruebas

Tareas	Días	Horas dedicadas
Configuración del sistema	15	60
Control	15	30
Total		90

Tabla 14: Horas de Pruebas

6.2. Precios descompuestos

Una vez hallado el tiempo necesario para desempeñar las tareas de cada unidad de obra y conociendo el conjunto de materiales y equipos a adquirir, se debe realizar el cálculo del coste total para cada una de las unidades de obra.

6.2.1. Diseño

- Diseño del frame:

Concepto	Importe
Ingeniero técnico	852,272727
Ordenador Portátil	0,30821918
Licencia Autodesk	2553,1
Total	3405,68095

Tabla 15: Precio descompuesto del Diseño del frame

- Diseño de la plataforma de pruebas:

Concepto	Importe
Ingeniero técnico	71,0227273
Total	71,0227273

Tabla 16: Precio descompuesto del Diseño de la plataforma

- Diseño de la electrónica

Concepto	Importe
Ingeniero técnico	170,454545
Ordenador Portátil	0,08219178
Total	170,536737

Tabla 17: Precio descompuesto del Diseño de la electrónica

6.2.2. Montaje

- Ensamblaje del frame:

Concepto	Importe
Operario	426,136364
Total	426,136364

Tabla 18: Precio descompuesto del Montaje del frame

- Montaje de la plataforma:

Concepto	Importe
Operario	42,6136364
Total	42,6136364

Tabla 19: Precio descompuesto del Montaje de la plataforma

- Conexión de la electrónica:

Concepto	Importe
Operario	255,681818
Total	255,681818

Tabla 20: Precio descompuesto de la Conexión de la electrónica

- Montaje del conjunto:

Concepto	Importe
Operario	170,454545
Materiales montaje	400,43
Total	570,884545

Tabla 21: Precio descompuesto del Montaje del conjunto

6.2.3. Fabricación

- Impresión 3D:

Concepto	Importe
Impresora 3D	37,73726027
Ordenador portátil	0,547945205
Operario	340,9090909
Materiales impresión 3D	52
Total	431,1942964

Tabla 22: Precio descompuesto de la Impresión 3D

- Torno

Concepto	Importe
Operario	34,09090909
Total	34,09090909

Tabla 23: Precio descompuesto del Torno

- Validación de la fabricación:

Concepto	Importe
Ingeniero técnico	28,40909091
Total	28,40909091

Tabla 24: Precio descompuesto de la Validación de la fabricación

6.2.4. Validación

- Validación del correcto funcionamiento de los actuadores:

Concepto	Importe
Ingeniero técnico	56,81818182
Total	56,81818182

Tabla 25: Precio descompuesto de la validación de los actuadores

6.2.5. Pruebas y control

- Configuración del sistema:

Concepto	Importe
Ingeniero tecnico	852,2727273
Ordenador portátil	0,410958904
Materiales configuración	201,51
Total	1054,193686

Tabla 26: Precio descompuesto de la configuración del sistema

- Control:

Concepto	Importe
Ingeniero técnico	426,1363636
Ordenador portátil	0,205479452
Total	426,3418431

Tabla 27: Precio descompuesto del Control

7. Presupuesto parcial

En el presente apartado se calcula el coste parcial asociado a cada grupo funcional. El mismo se ha obtenido multiplicando y sumando el coste de las unidades de obra que componen cada grupo teniendo en cuenta las veces que deben realizarse en el proyecto.

7.1. Presupuesto parcial del diseño

Unidad de obra	Precio
Diseño del frame	3405,680946
Diseño plataforma	71,02272727
Diseño de electrónica	170,5367372
Subtotal	3647,240411

Tabla 28: Presupuesto parcial del diseño

7.2. Presupuesto parcial de la fabricación

Unidad de obra	Precio
Impresión 3D	379,1942964
Torno	34,09090909
Validación	28,40909091
Subtotal	441,6942964

Tabla 29: Presupuesto parcial de la fabricación

7.3. Presupuesto parcial del montaje

Unidad de obra	Precio
Ensamblaje del frame	426,1363636
Montaje plataforma	42,61363636
Conexión electrónica	255,6818182
Montaje del conjunto	170,4545455
Subtotal	894,8863636

Tabla 30: Presupuesto parcial del Montaje

7.4. Presupuesto parcial de la validación

Unidad de obra	Precio
Validación actuadores	56,81818182
Subtotal	56,81818182

Tabla 31: Presupuesto parcial de la validación de actuadores

7.5. Presupuesto parcial de la configuración y control

Unidad de obra	Precio
Configuración del sistema	852,6836862
Control	426,3418431
Subtotal	1279,025529

Tabla 32: Presupuesto parcial de la configuración y control

8. Presupuesto de ejecución material, de inversión y de licitación

En la última sección de este documento se calcula el importe total del proyecto incluyendo costes derivados de impuestos, beneficio y gastos generales.

Concepto	Coste (€)
Diseño	3647,24041
Fabricación	493,694296
Montaje	1295,31636
Validación	56,8181818
Control	1480,53553
PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN MATERIAL	6973,61
Gastos generales (15%)	1046,04072
Beneficio Industrial (7%)	488,152335
PRESUPUESTO TOTAL DE INVERSIÓN	8507,80
Impuesto sobre el valor añadido (21%)	1786,63755
COSTE FINAL	10294,44

Tabla 33: PRESUPUESTO FINAL

Asciende el presupuesto total de ejecución material a SEIS MIL NOVECIENTOS SETENTA Y TRES EUROS CON 61 CÉNTIMOS

Asciende el presupuesto total de inversión a OCHO MIL QUINIENTOS SIETE EUROS CON OCHENTA CÉNTIMOS

Asciende el coste final del proyecto a DIEZ MIL DOSCIENTOS NOVENTA Y CUATRO EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS