



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño
Universitat Politècnica de València

Diseño, fabricación, control y análisis de un dron cuadricóptero convertible

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Autor: Luis Lakan Barreres Del Mundo

Tutor: Pedro José García Gil

Cotutor: José Manuel Castiblanco Quintero

Curso 2016-2017

Resumen

En los últimos años la popularización de los drones ha abierto un mundo de infinitas posibilidades. El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es diseñar, fabricar, analizar y controlar un dron innovador, competente y completamente operativo.

En primer lugar, se ha analizado la historia reciente, el mercado actual y las aplicaciones de los drones existentes. Tras este estudio inicial se ha decidido construir un dron cuadricóptero convertible que sea capaz de operar convencionalmente o de manera horizontal haciendo uso de alas. Posteriormente, se ha realizado el diseño en CAD teniendo en cuenta los requisitos aerodinámicos y operativos. Una vez establecido el diseño se ha fabricado, soldado y montado todos los componentes. A continuación, se ha configurado el control mediante el uso de un *software* y se ha analizado el vuelo del dron en sus diferentes configuraciones. Finalmente, se han recogido conclusiones a partir de los datos obtenidos del vuelo y de cada análisis realizado durante todo el proceso.

Este documento también incluye un presupuesto que detalla el coste real de realización del trabajo y el de fabricación del dron, con el fin de servir de base para una posible comercialización.

Palabras clave: dron, cuadricóptero, diseño, control

Resum

En els últims anys la popularització dels drons ha obert un món d'infinites possibilitats. L'objectiu principal d'aquest Treball Fi de Grau és dissenyar, fabricar, analitzar i controlar un dron innovador, competent i completament operatiu.

En primer lloc, s'ha analitzat la història recent, el mercat actual i les aplicacions dels drons existents. Després d'aquest estudi inicial s'ha decidit construir un dron quadricòpter convertible que siga capaç d'operar convencionalment o de manera horitzontal fent ús d'ales. Posteriorment, s'ha realitzat el disseny en CAD tenint en compte els requisits aerodinàmics i operatius. A continuació, s'ha configurat el control mitjançant l'ús d'un *software* i s'ha analitzat el vol del dron en les seues diferents configuracions. Finalment, s'han recollit conclusions a partir de les dades obtingudes del vol i de cada anàlisi realitzat durant tot el procés.

Aquest document també inclou un pressupost que detalla el cot real de realització i fabricació del dron, amb l'objectiu de servir de base per a una possible comercialització.

Paraules clau: dron, quadricòpter, disseny, control

Abstract

The popularity of drones has recently opened a world of infinite possibilities. The main objective of this University Degree Final Project is to design, manufacture, control and analyze an innovative, competent and fully operational drone.

The first step was to analyze the recent history, the current market and the applications of the existing drones. After this initial study, the decision was made to build a quadcopter convertible drone that is able to operate conventionally or horizontally using wings. Subsequently, the CAD design was accomplished taking into account aerodynamic and operational requirements. Once the design was established, all components were manufactured, welded and assembled. Then, the control was configured with the use of software and the flight of the drone in its different configurations was analyzed. Finally, conclusions were drawn from the data obtained from the flights and the analyses performed during the entire process.

This document also includes the budget list detailing the real cost of the work and the manufacturing of the drone, in order to serve as the basis for its possible commercialization.

Key words: dron, quadcopter, design, control

Índice general

| | |
|--|------------|
| Índice general | IX |
| Índice de figuras | XI |
| Índice de tablas | XIV |
| <hr/> | |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Motivación | 1 |
| 1.2 Objetivos | 1 |
| 1.3 Estructura de la memoria | 2 |
| 2 Drones | 3 |
| 2.1 Historia | 3 |
| 2.1.1 Definición | 3 |
| 2.1.2 Inicio de los drones | 3 |
| 2.1.3 Drones en la actualidad | 5 |
| 2.2 Operatividad | 5 |
| 2.2.1 Tipos de drones | 5 |
| 2.2.2 Aplicaciones de los drones | 7 |
| 2.3 Anatomía de los drones | 10 |
| 2.3.1 Estructura | 10 |
| 2.3.2 Electrónica | 11 |
| 2.4 Mecánica de vuelo | 15 |
| 2.4.1 Drones multirrotores | 16 |
| 2.4.2 Drones de ala fija | 20 |
| 3 Diseño | 27 |
| 3.1 Estudio preliminar | 27 |
| 3.2 Dimensionamiento | 33 |
| 3.3 Electrónica | 36 |
| 3.4 Estructura | 43 |
| 3.4.1 Elementos | 43 |
| 3.4.2 Análisis de esfuerzos | 46 |
| 3.5 Alas | 50 |
| 3.5.1 Estimaciones iniciales | 51 |
| 3.5.2 Selección del perfil alar | 56 |
| 3.6 Modelado | 63 |
| 4 Fabricación | 67 |
| 4.1 Material | 67 |
| 4.2 Estructura | 68 |
| 4.3 Componentes electrónicos | 69 |
| 4.4 Alas | 74 |
| 5 Control | 79 |
| 6 Viabilidad | 87 |
| 6.1 Operatividad | 87 |
| 6.1.1 Maniobrabilidad | 87 |
| 6.1.2 Autonomía | 89 |

| | |
|---|------------|
| 6.1.3 Velocidad | 91 |
| 6.2 Estudio económico | 92 |
| 7 Conclusiones | 97 |
| 7.1 Posibles optimizaciones y mejoras | 97 |
| Bibliografía | 105 |

Apéndices

| | |
|------------------------------------|------------|
| A Ensayo de motor | 107 |
| B Bocetos y modelos previos | 109 |
| C Galería de fotos | 111 |

Índice de figuras

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | El <i>Aerodome</i> de Samuel Pierpont Langley. (Fuente: www.flyingmachines.ru) | 3 |
| 2.2 | Dron Predator durante el despegue. (Fuente: www.cnn.com) | 4 |
| 2.3 | Placa de piloto automático de la compañía Arduino. (Fuente: www.FPV-community.de) | 5 |
| 2.4 | Dron Disco de la compañía Parrot volando. (Fuente: www.iee.spectrum.org) | 6 |
| 2.5 | Dron hexacóptero de la compañía Yuneec modelo Typhoon H Pro. (Fuente: www.latam.pcmag.com) | 7 |
| 2.6 | Orotofotografía realizada con la aplicación <i>Dronemapper</i> a partir de varias fotografías. (Fuente: www.conservationdrones.org) | 8 |
| 2.7 | Dron de la compañía de correo Amazon. (Fuente: www.amazon.com) | 9 |
| 2.8 | Marco multirrotor de un dron. (Fuente: www.madridgadgetstore.com) | 10 |
| 2.9 | Avión de radiocontrol con tren de aterrizaje en disposición convencional. (Fuente: www.easyrc.com) | 11 |
| 2.10 | Controladora para dron de carreras. (Fuente: www.seriouslypro.com) | 12 |
| 2.11 | Transmisor modelo FlySky con 6 canales y frecuencia de 2.4 GHz. (Fuente: www.rctecnic.com) | 14 |
| 2.12 | Motor Brushless con 18 mm de diámetro de rotor, 4 mm de altura de estator y 2400 KV. (Fuente: www.modeltronic.es) | 15 |
| 2.13 | Disposición de los ejes en un dron cuadricóptero. (Fuente: Propia) | 16 |
| 2.14 | Movimiento de cabeceo en un dron cuadricóptero. (Fuente: Propia) | 17 |
| 2.15 | Ángulo de cabeceo en un dron cuadricóptero. (Fuente: Propia) | 18 |
| 2.16 | Movimiento de alabeo en un dron cuadricóptero. (Fuente: Propia) | 18 |
| 2.17 | Movimiento de guiñada en un dron cuadricóptero. (Fuente: Propia) | 19 |
| 2.18 | Sentido de giro de los motores para diferentes configuraciones de drones multirrotores. (Fuente: www.mydronelab.com) | 20 |
| 2.19 | Elementos aerodinámicos y superficies de control en un dron de ala fija. (Fuente: www.cursopilotodedrones.net) | 20 |
| 2.20 | Ejes cuerpo en un dron de ala fija. (Fuente: www.whiteboxlearning.com) | 21 |
| 2.21 | Distribución de las fuerzas que intervienen en el movimiento del cabeceo. (Fuente: Doc. [3, Tema 1_A, pág. 13]) | 22 |
| 2.22 | Movimiento de alabeo en un dron de ala fija mediante uso de los alerones. (Fuente: www.cursopilotosdedrones.net) | 24 |
| 2.23 | Movimiento de guiñada mediante uso del timón de dirección. (Fuente: www.takeoffbriefing.com) | 25 |
| 3.1 | Dron cuadricóptero con alas modelo Parrot Swing. (Fuente: www.Parrot.com) | 28 |
| 3.2 | Dron cuadricóptero modelo Spark. (Fuente: www.Apple.com) | 28 |
| 3.3 | Dron cuadricóptero con alas modelo Parrot Swing. (Fuente: www.Parrot.com) | 28 |
| 3.4 | Dron de ala fija modelo Ebee. (Fuente: www.geosistemassrl.com) | 29 |
| 3.5 | Dron de ala fija modelo Parrot Disco. (Fuente: www.popsi.com) | 29 |
| 3.6 | Dron cuadricóptero en cruz con alas incorporadas modelo X PlusOne. (Fuente: www.xcraft.com) | 29 |
| 3.7 | Pesos de los drones semejantes. (Fuente: Propia) | 31 |
| 3.8 | Velocidades de los drones semejantes. (Fuente: Propia) | 31 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.9 | Autonomía de los drones semejantes. (Fuente: Propia) | 32 |
| 3.10 | Motor modelo Racerstar Racing Edition BR1103 elegido para el dron. (Fuente: www.racerstar.com) | 36 |
| 3.11 | Características de los motores. (Fuente: www.racerstar.com) | 37 |
| 3.12 | Controlador electrónico de velocidad del dron modelo Racerstar RS6A V2 6A 1-2S . (Fuente: www.racerstar.com) | 37 |
| 3.13 | Hélices modelo Racerstar 2030 R-BN55X3 . (Fuente: www.racerstar.com) | 38 |
| 3.14 | Controladora de vuelo modelo F3 Acro 6 DOF/Deluxe 10 DOF . (Fuente: www.banggood.com) | 39 |
| 3.15 | PDB modelo Lantian BEC Output 5V 12V 3A. (Fuente: www.banggood.com) | 40 |
| 3.16 | Batería modelo ZOP Power 7.4V 850MAH. (Fuente: www.banggood.com) | 40 |
| 3.17 | Emisora modelo <i>FR Sky X9D</i> . (Fuente: www.elcuelodeldrone.com) | 41 |
| 3.18 | Receptor modelo <i>FR Sky XM</i> . (Fuente: www.hobbyking.com) | 42 |
| 3.19 | Diseños de marcos multirrotor. (Fuente: Propia) | 43 |
| 3.20 | Diseños de los marcos frontales. (Fuente: Propia) | 44 |
| 3.21 | Diseños de las patas. (Fuente: Propia) | 44 |
| 3.22 | Diseño del soporte de las alas. (Fuente: Propia) | 45 |
| 3.23 | Plano acotado de las piezas que componen la estructura del dron. (Fuente: Propia) | 46 |
| 3.24 | Distribución de la Tensión de Von Mises del modelo 1 de marco multirrotor. (Fuente: Propia) | 47 |
| 3.25 | Deformación del modelo 1 de marco multirrotor. (Fuente: Propia) | 48 |
| 3.26 | Distribución de la Tensión de Von Mises del modelo 2 de marco multirrotor. (Fuente: Propia) | 48 |
| 3.27 | Deformación del modelo 2 de marco multirrotor. (Fuente: Propia) | 48 |
| 3.28 | Distribución de la Tensión de Von Mises del modelo 3 de marco multirrotor. (Fuente: Propia) | 49 |
| 3.29 | Deformación del modelo 3 de marco multirrotor. (Fuente: Propia) | 49 |
| 3.30 | Distribución de fuerzas durante el vuelo del dron. (Fuente: Propia) | 53 |
| 3.31 | Curva polar del perfil <i>NACA 6409</i> . (Fuente: Summary of Low-Speed Airfoil Data doc. [7, pág. 145]) | 57 |
| 3.32 | Gráficos del perfil <i>NACA 6409</i> dónde la curva naranja corresponde a un $Re = 100\,000$ y la azul a un $Re = 50\,000$. (Fuente: www.airfoiltools.com) | 57 |
| 3.33 | Distribución de los vórtices en punta de ala y efecto <i>downwash</i> . (Fuente: www.aeroscrapp.blogspot.com) | 59 |
| 3.34 | Esquema de la reducción del ángulo de ataque debido al efecto del <i>downwash</i> . (Fuente: [9]) | 59 |
| 3.35 | Modelización del ala mediante la teoría de Prandtl. (Fuente: [9]) | 60 |
| 3.36 | Modelización del ala mediante la teoría de Helmholtz. (Fuente: www.heli-air.net) | 60 |
| 3.37 | Modelado CAD de la estructura del dron. (Fuente: Propia) | 63 |
| 3.38 | Planta, alzado y perfil (derecha a izquierda) del modelo CAD de la estructura del dron. (Fuente: Propia) | 64 |
| 3.39 | Modelado CAD del dron sin las alas. (Fuente: Propia) | 64 |
| 3.40 | Planta, alzado y perfil (derecha a izquierda) del modelo CAD del dron cuadricóptero sin las alas. (Fuente: Propia) | 64 |
| 3.41 | Modelado CAD del dron con las alas. (Fuente: Propia) | 65 |
| 3.42 | Planta, alzado y perfil del modelo CAD del dron cuadricóptero con las alas. (Fuente: Propia) | 65 |
| 4.1 | Plano de corte de la estructura del dron. (Fuente: Propia) | 69 |
| 4.2 | Máquina láser realizando el corte de la estructura del dron. (Fuente: Propia) | 69 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.3 | Soldadura de los ESCs. (Fuente: Propia) | 70 |
| 4.4 | Esquema del circuito eléctrico. (Fuente: Propia) | 71 |
| 4.5 | Cableado del dron. (Fuente: Propia) | 71 |
| 4.6 | Esquema eléctrico de la antena. (Fuente: Propia) | 72 |
| 4.7 | Conexiones de la antena. (Fuente: Propia) | 72 |
| 4.8 | Planta del dron cuadricóptero sin las alas. (Fuente: Propia) | 73 |
| 4.9 | Perfil del dron cuadricóptero sin las alas. (Fuente: Propia) | 73 |
| 4.10 | Brazo del dro cuadricóptero sin alas. (Fuente: Propia) | 73 |
| 4.11 | Vista posterior de la planta del dron. (Fuente: Propia) | 74 |
| 4.12 | Material bicomponente para soldadura en frío. (Fuente: www.araldite.com) | 74 |
| 4.13 | Máquina de corte por hilo. (Fuente: Propia) | 75 |
| 4.14 | Sección del ala en programa <i>DevFoam</i> . (Fuente: Propia) | 76 |
| 4.15 | Recorrido de corte en el programa <i>DevFoam</i> . (Fuente: Propia) | 76 |
| 4.16 | Alas y soporte. (Fuente: Propia) | 77 |
| 4.17 | Vista posterior de las alas y el soporte. (Fuente: Propia) | 77 |
| 4.18 | Soldadura en frío en el soporte de las alas. (Fuente: Propia) | 77 |
| 4.19 | Perfil alar de las alas. (Fuente: Propia) | 77 |
| | | |
| 5.1 | Ventana de inicio del programa <i>BetaFlight</i> . (Fuente: Propia) | 79 |
| 5.2 | Ventana de instalación del <i>firmware</i> del programa <i>BetaFlight</i> . (Fuente: Propia) | 80 |
| 5.3 | Ventana de preparación del programa <i>BetaFlight</i> . (Fuente: Propia) | 81 |
| 5.4 | Ventana de puertos del programa <i>BetaFlight</i> . (Fuente: Propia) | 81 |
| 5.5 | Ventana de configuración del programa <i>BetaFlight</i> . (Fuente: Propia) | 82 |
| 5.6 | Continuación de la ventana de configuración del programa <i>BetaFlight</i> . (Fuente: Propia) | 83 |
| 5.7 | Final de la ventana de configuración del programa <i>BetaFlight</i> . (Fuente: Propia) | 83 |
| 5.8 | Ventana de configuración del PID del programa <i>BetaFlight</i> . (Fuente: Propia) | 84 |
| 5.9 | Ventana del receptor del programa <i>BetaFlight</i> . (Fuente: Propia) | 84 |
| 5.10 | Pantalla de configuración y botones de la emisora modelo FR Sky X9D. (Fuente: www.img.banggood.com) | 85 |
| 5.11 | Ventana de Modos del programa <i>BetaFlight</i> . (Fuente: Propia) | 86 |
| | | |
| 6.1 | Voltereta durante el ensayo de maniobrabilidad del dron cuadricóptero sin alas. (Fuente: Propia) | 88 |
| 6.2 | Ensayo de maniobrabilidad del dron cuadricóptero con las alas. (Fuente: Propia) | 88 |
| 6.3 | Ensayo de autonomía con el dron cuadricóptero sin las alas. (Fuente: Propia) | 89 |
| 6.4 | Ensayo de autonomía con el dron cuadricóptero sin las alas. (Fuente: Propia) | 90 |
| | | |
| A.1 | Banco de pruebas para los motores. (Fuente: Propia) | 107 |
| A.2 | Banco de pruebas con cubierta de seguridad. (Fuente: Propia) | 107 |
| A.3 | Fuerza de empuje velocidad de giro de las hélices obtenidas del ensayo. (Fuente: Propia) | 108 |
| A.4 | Fuerza de empuje y eficiencia obtenidas del ensayo. (Fuente: Propia) | 108 |
| | | |
| B.1 | Bocetos previos de posibles diseños de dron. (Fuente: Propia) | 109 |
| B.2 | Bocetos previos de posibles diseños de dron. (Fuente: Propia) | 109 |
| B.3 | Modelo de dron desechado por peso excesivo. (Fuente: Propia) | 110 |
| B.4 | Diseño del modelo de dron previo al definitivo. (Fuente: Propia) | 110 |

Índice de tablas

| | | |
|------|---|-----|
| 3.1 | Especificaciones de drones semejantes con pequeñas dimensiones. | 30 |
| 3.2 | Especificaciones de drones semejantes de tamaño medio. | 30 |
| 3.3 | Características de los motores del dron. | 36 |
| 3.4 | Datos operativos de los motores. | 36 |
| 3.5 | Datos de los controladores electrónicos de velocidad. | 37 |
| 3.6 | Datos de los controladores electrónicos de velocidad. | 38 |
| 3.7 | Datos de la controladora de vuelo. | 39 |
| 3.8 | Datos de la placa distribuidora. | 40 |
| 3.9 | Datos de la batería. | 41 |
| 3.10 | Datos del receptor. | 42 |
| 3.11 | Comparación entre los pesos estimados y los reales. | 42 |
| 3.12 | Datos de los diferentes modelos de marcos multirrotores. | 49 |
| 3.13 | Números de Reynolds. (Fuente: www.laplace.us.es) | 56 |
| 3.14 | Valor de CL del perfil aerodinámico. (Fuente: Propia) | 58 |
| 3.15 | Características iniciales de las alas. | 58 |
| 3.16 | Valores de los parámetros necesarios para aplicar la teoría de Ala Larga de Prandtl. | 62 |
| 3.17 | Parámetros de vuelo del dron. | 63 |
| 4.1 | Componentes electrónicos del dron. | 67 |
| 4.2 | Herramientas requeridas para la fabricación del dron. | 67 |
| 4.3 | Componentes estructurales del dron. | 68 |
| 6.1 | Autonomía del dron sin alas y en vuelo estático. (Fuente: Propia) | 89 |
| 6.2 | Autonomía del dron con alas y en vuelo estático. (Fuente: Propia) | 90 |
| 6.3 | Comparativa de la autonomía con los drones semejantes. (Fuente: Propia) | 90 |
| 6.4 | Velocidad máxima del dron sin las alas. (Fuente: Propia) | 91 |
| 6.5 | Velocidad máxima del dron con las alas. (Fuente: Propia) | 92 |
| 6.6 | Comparativa de la velocidad con los drones semejantes. (Fuente: Propia) | 92 |
| 6.7 | Coste económico de los componentes electrónicos del dron. | 93 |
| 6.8 | Coste económico de los componentes estructurales del dron. | 93 |
| 6.9 | Coste económico de los procesos de fabricación del dron. | 93 |
| 6.10 | Coste económico total del dron. | 94 |
| 6.11 | Precio de venta del dron. | 94 |
| 6.12 | Características y precios de drones semejantes con pequeñas dimensiones. | 94 |
| 7.1 | Presupuesto parcial del estudio inicial sobre los drones y sus aplicaciones en el mercado actual. | 101 |
| 7.2 | Presupuesto parcial del diseño y modelado CAD del dron. | 101 |
| 7.3 | Presupuesto parcial de la tarea de fabricación del dron. | 101 |
| 7.4 | Presupuesto parcial de la tarea de diseño de control del dron. | 101 |
| 7.5 | Presupuesto parcial de la tarea del estudio viabilidad comercial y el análisis de vuelo del dron. | 102 |
| 7.6 | Presupuesto parcial del material fungible requerido para la estructura. | 102 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 7.7 | Presupuesto parcial del material fungible correspondientes a los componentes electrónicos. | 102 |
| 7.8 | Presupuesto parcial del material no fungible. | 103 |
| 7.9 | Presupuesto total del proyecto. | 103 |
| A.1 | Parámetros obtenidos del ensayo. | 108 |

Lista de símbolos

| | |
|------------|--------------------------------------|
| T | Fuerza de empuje |
| m | Masa |
| g | Aceleración gravitacional |
| I | Inercia |
| Ω | Velocidad angular |
| θ | Ángulo de cabeceo |
| φ | Ángulo de alabeo |
| ψ | Ángulo de guiñada |
| M | Momento |
| τ | Momento torsor |
| V | Velocidad |
| L | Fuerza de sustentación |
| ρ | Densidad |
| α | Ángulo de ataque |
| ϵ | Factor de desviación de la corriente |
| δ | Ángulo de deflexión |
| A | Área |
| h | Altura |
| c | Cuerda |
| b | Envergadura |
| W | Peso |
| D | Drag |
| RE | Número de Reynolds |
| ν | Viscosidad cinemática |
| θ_t | Ángulo de torsión geométrica |
| w | Velocidad inducida |

Lista de abreviaciones

| | |
|-------------|--|
| <i>GPS</i> | Sistema de Posicionamiento Global (<i>Global Positional System</i>) |
| <i>TQM</i> | Teoría de la Cantidad de Movimiento |
| <i>TMC</i> | Teoría del Momento Cinético |
| <i>CDG</i> | Centro de Gravedad |
| <i>CA</i> | Centro Aerodinámico |
| <i>RC</i> | Radiocontrol |
| <i>PDB</i> | Placa Distribuidora (<i>Power Distribution Board</i>) |
| <i>FC</i> | Controladora de Vuelo (<i>Flight Controller</i>) |
| <i>ESC</i> | Controlador Electrónico de Velocidad (<i>Electronic Speed Controller</i>) |
| <i>CPU</i> | Unidad Central de Procesamiento (<i>Central Processor Unit</i>) |
| <i>CL</i> | Coefficiente de Sustentación (<i>Lift Coefficient</i>) |
| <i>CD</i> | Coefficiente de Resistencia (<i>Drag Coefficient</i>) |
| <i>CAD</i> | Diseño Asistido por Ordenador (<i>Computer Aided Design</i>) |
| <i>NACA</i> | Comité Consejero Nacional de la Aeronáutica (<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>) |
| <i>AR</i> | Relación de Aspecto (<i>Aspect Ratio</i>) |

*A mi familia por
su apoyo y por contagiarme
su pasión por este mundo.*

*A mi compañero y amigo Alberto,
mi tutor Pedro y mi cotutor Jose
por brindarme esta oportunidad.*

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Motivación

Hasta hace poco tiempo los drones tenían un uso exclusivo militar. No obstante, gracias a los avances tecnológicos se ha conseguido que estos vehículos trasciendan al ámbito civil. Se han popularizado de tal manera que existe una gran diversidad de modelos y aplicaciones. Además, hoy en día, su reducido coste y sencillo manejo permiten que cualquiera esté al alcance de volar un dron.

En este proyecto se ha querido fabricar un dron totalmente funcional desde cero, afrontando por tanto, todos los problemas que conlleva. Además, se ha tratado de crear un vehículo innovador para estudiar su viabilidad y su posible lugar en el mercado actual. Se trata de la creación de un dron cuadricóptero con alas, de este modo, se intentará combinar las ventajas de los drones de ala fija con las de los multirrotores.

Se ha elegido realizar este trabajo por la posibilidad de crear un dron operativo siguiendo todo el proceso desde el planteamiento del diseño hasta su control y posterior análisis. Se trata de una oportunidad única para poner a prueba nuestros conocimientos adquiridos en la carrera y crear un proyecto único siguiendo el procedimiento completo que realizaría una empresa real. Además, a pesar del esfuerzo adicional que supone, el trabajo práctico y manual supone un atractivo que muchos consideran un hobby.

1.2 Objetivos

Al tratarse de un proyecto que abarca tantos y tan diferentes aspectos, los objetivos no pueden ser menos numerosos. Podemos dividir el trabajo en cinco grandes grupos con sus respectivos objetivos: estudio inicial, diseño, fabricación, control, análisis y comercialización. De este modo se enumeran los siguientes objetivos:

1. Realizar un estudio sobre la diversidad actual de drones y sus aplicaciones con el fin de construir un dron óptimo y más eficiente que sus competidores en el ámbito comercial elegido.
2. Diseñar un dron con estructura robusta y ligera con fácil reproducción y montaje. Además, tanto su estructura como sus componentes electrónicos han de adecuarse a los requisitos operativos y tener el menor coste económico posible.
3. Fabricar el diseño previamente realizado y ensamblar las piezas juntamente con los componentes electrónicos.

4. Establecer con éxito el control del dron teniendo en cuenta la complejidad que supone la implementación de las alas en el cuadricóptero.
5. Analizar y establecer numéricamente las ventajas y diferencias que supone la implementación de las alas.
6. Realizar un análisis de la viabilidad comercial del dron.

Cabe mencionar que estos objetivos no suponen un límite, se ha mantenido siempre una predisposición a ampliar el proyecto con investigaciones adicionales. No obstante, se debe tener en cuenta que debido a la envergadura del proyecto, este trabajo ya supone una gran meta que superar. En resumidas palabras, se trata de fabricar y volar un dron con alas y analizar las posibles ventajas que presente.

1.3 Estructura de la memoria

La extensión y diversidad del proyecto complica la estructuración de la memoria. Se ha tratado de organizar el presente documento lo más coherentemente posible de modo que facilite la lectura y comprensión del lector. De este modo podemos diferenciar tres grandes partes.

La primera parte es un estudio general sobre los drones. Incluye parte de su historia, un análisis de su diversidad y aplicaciones, una descripción sobre su anatomía y una explicación de los fundamentos aerodinámicos en los que se basan. De este modo, se pretende adquirir los conocimientos necesarios para diseñar un dron innovador con un lugar en el mercado actual.

La segunda parte es la más importante y compleja. Se trata de una descripción completa del proceso realizado en la creación del dron. Se ha seguido el orden cronológico del proceso seguido desde el inicio hasta el final. Incluye las diferentes ideas barajadas y los problemas superados en cada una de las diferentes fases de fabricación.

Por último, la última parte de la memoria incluye el presupuesto que ha implicado este trabajo y el necesario para fabricar el dron además de otros datos de relevancia.

CAPÍTULO 2

Drones

2.1 Historia

Para poder comprender mejor el presente documento es conveniente examinar el camino recorrido por los drones a lo largo de la historia. De este modo, podremos situarnos en el contexto actual y discernir la repercusión de estos innovadores vehículos en la sociedad. Por último, la observación del desarrollo reciente de los drones nos permite predecir con mayor precisión su posible evolución en el futuro y por tanto, construir un dron que pueda ser competente y rentable para los próximos años.

2.1.1. Definición

En primer lugar analizamos el término dron. Hasta hace pocos años, este término tenía mala fama ya que se asociaba a ataques aéreos militares y guerra. No obstante, en el presente se ha producido un gran crecimiento en la diversidad y producción de los drones. En todo el mundo se usan para ocio, investigación, preservación, agricultura y hasta para salvar vidas. Técnicamente, se trata de vehículos aéreos no tripulados capaces de operar de manera totalmente autónoma desde el despegue hasta el aterrizaje. Cabe destacar que en la actualidad existen cuadricópteros y otros vehículos, que no son técnicamente drones debido a que son teledirigidos, sin embargo, la sociedad los considera como tal.

2.1.2. Inicio de los drones

De este modo, según como definamos el término dron, podemos remontarnos a una fecha u otra. En 1849, el ejército austríaco ya utilizó globos con bombas en el ataque a Venecia que podrían ser considerados vehículos aéreos no tripulados. No obstante, se suele considerar como primer vuelo de un vehículo no tripulado el realizado por un avión de Otto Lilienthal en 1890. Este pionero alemán creaba diseños experimentales de aviones que no requerían de pilotos para operar, de este modo se evitaban lesiones. Paralelamente y al otro lado del océano Atlántico, el astrónomo



Figura 2.1: El Aerodome de Samuel Pierpont Langley. (Fuente: www.flyingmachines.ru)

mo, físico e inventor estadounidense Samuel Pierpont Langley experimentaba con aviones de vapor. Utilizaba un sistema con catapulta para lanzar un avión no tripulado conocido como el "Aerodome", el cuál logró volar casi una milla a lo largo del río Potomac en 1886. No obstante, se trataba de un modelo reducido de un avión tripulado que nunca alcanzó a despegar. Debido a este motivo, se abandonó el proyecto.

A pesar de los exitosos vuelos de los vehículos no tripulados, existían grandes limitaciones tecnológicas para conseguir controlarlos una vez se alzaban en el aire. Por ello, se centraron los esfuerzos y las investigaciones en el desarrollo de aeronaves tripuladas. Poco después, en 1903, los hermanos Wright conseguían realizar el primer vuelo controlado gracias a un innovador sistema de torsión de alas. En 1914, Lawrence Sperry logró volar haciendo uso de un piloto automático gracias a la ayuda de un giroscopio que inventó su empresa familiar. En esa misma época, el profesor Archibald Low tuvo un importante papel en el desarrollo de un sistema radiocontrol que permitió el vuelo controlado a distancia de Ruston Proctor AT en 1917. Pero no fue hasta 1922 cuando se consiguió volar con éxito un cuadricóptero. Conocido por el nombre de helicóptero De Bothezat, utilizaba rotores en una estructura en X. No obstante, la complejidad mecánica suponía una carga de trabajo para el piloto demasiado alta.

La Segunda Guerra Mundial supuso un auge en el avance de los vehículos no tripulados, especialmente en Alemania. Desarrollaron gran cantidad de modelos de misiles tierra-aire como el famoso Fieseler V-1 que hacía uso de un pulsorreactor. También, la fuerza aérea nazi conocida como Luftwaffe, hacía uso de bombas planeadoras guiadas por radiocontrol para atacar los buques de guerra. Los aliados, también hicieron uso de los aviones no tripulados durante esta guerra. La marina estadounidense usó el dron de asalto TDR-1. Se trataba de un dron con doble motor que transportaba una carga explosiva. Fue el primer misil pilotado por vídeo. Se controlaba de forma remota por un operador desde un avión y haciendo uso de una cámara, el piloto veía lo mismo que el TDR-1. Otro conocido programa americano fue el llamado Proyecto Afrodita, encargado de transformar bombarderos como el B-17 en aviones no tripulados. El proyecto fue un fracaso debido al alto coste y a su complejidad. No obstante, estos aviones no tripulados y controlados remotamente se utilizaron en las pruebas con bombas nucleares para volar a través del hongo nuclear y estudiar los efectos de la radiación.



Figura 2.2: Dron Predator durante el despegue. (Fuente: www.cnn.com)

Tras la Segunda Guerra Mundial, la tecnología mejoró haciendo posible la creación de una nueva generación de drones de reconocimiento. Tiene especial interés el popular dron Predator con gran autonomía y altura de vuelo. A pesar de que empezó como dron de reconocimiento, sus considerables prestaciones provocaron que desarrollaran versiones armadas en 2001 las cuales continúan en uso hoy en día.

2.1.3. Drones en la actualidad

Como ha ocurrido a lo largo de la historia, esta tecnología desarrollada para el ejército, se propagó al ámbito civil. De este modo surgió un colectivo aficionado a los drones. Como consecuencia, se creó el proyecto Paparazzi. Dicho proyecto consistía en el desarrollo de un sistema de piloto automático con código abierto. De este modo, se publica el código fuente, haciendo posible que desarrolladores de todo el mundo puedan corregir, mejorar y optimizar los diseños del hardware. Alrededor de 2009, el auge del desarrollo de teléfonos móviles permitió que se mejoraran y se redujeran los costes de los procesadores y los sensores. Esto implicó la inclusión de mejoras considerables y abaratar los costes en los proyectos de pilotos automáticos.

Este desarrollo permitió que apareciera otro proyecto de código abierto de piloto automático conocido como ArduPilot. El objetivo de dicho proyecto era conseguir que los drones fueran más accesibles a la gente. La conocida empresa Arduino, cada año añade nuevas características y hace que todos los sistemas sean más fáciles de usar.

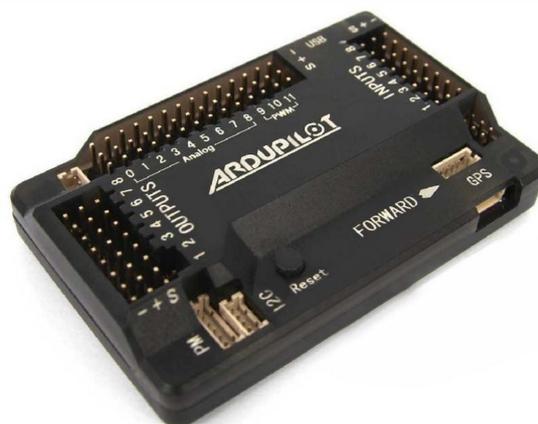


Figura 2.3: Placa de piloto automático de la compañía Arduino. (Fuente:www.FPV-community.de)

2.2 Operatividad

Los avances tecnológicos de los últimos años han permitido un creciente desarrollo en el mercado de los drones. Por ello, se ha producido una gran diversificación en los modelos y en la utilidad de estos vehículos no tripulados. Tras haber revisado su historia reciente podemos adentrarnos en aspectos más técnicos.

2.2.1. Tipos de drones

Podemos clasificar la totalidad de los drones según su configuración. De este modo diferenciamos principalmente dos tipos: de ala fija, similares a los aviones convencionales donde la sustentación del vehículo se consigue a través de alas; y de ala giratoria, que se basan en los mismos principios aerodinámicos que los helicópteros, donde las "alas" giran para conseguir elevar el vehículo, dichas alas se conocen como palas y en conjunto forman un rotor.

Ala fija

Los elementos principales de los vehículos de ala fija son la planta propulsora y las alas. En el caso de los drones de ala fija y pequeñas dimensiones, la planta propulsora suele estar compuesta por motores eléctricos que alimentan uno o varios rotores. Dichos rotores se disponen de manera perpendicular al eje longitudinal del avión y proporcionan la fuerza de avance. Esta fuerza debe ser superior a la fuerza de resistencia aerodinámica. Por otro lado, las alas, basándose en el principio de Bernoulli, proporcionan una fuerza

vertical que a su vez, debe ser superior al peso del avión. De este modo, conseguimos que la aeronave alcance el vuelo y consiga avanzar en el aire.

No obstante, se pretende controlar el vuelo del vehículo. Para ello, se deberán controlar los tres movimientos propios de los aviones: cabeceo, alabeo y guiñada. Dichos movimientos corresponden a tres ejes definidos por convenio, de modo que cualquier movimiento que realice el avión durante el vuelo es combinación de estos. Los elementos que producen dichos movimientos son: los alerones, el timón de profundidad y el timón de cola. Los alerones son superficies de control situadas en los extremos de las alas y en sus borde fuga. Dichas superficies modifican la geometría del ala variando su sustentación de manera antisimétrica, es decir, cuando una sube, la otra baja y viceversa. De este modo, se produce una diferencia de fuerzas entre ambas alas que provoca que el avión alabee. Al igual que los alerones, el timón de cola, es un conjunto de superficies horizontales que modifican la sustentación, pero en este caso, de la cola. De este modo, genera un momento sobre el vehículo que provoca su cabeceo. Por último, existe una superficie vertical conocida como timón de cola. Al desplazarse, genera unas fuerzas que provocan un momento sobre el eje vertical del dron. Dicho momento es el correspondiente al movimiento de guiñada. De este modo, haciendo uso de estos tres elementos de control, se es capaz de dominar la actitud de la aeronave. Cabe destacar, que en ocasiones, estas superficies son sustituidas por otros elementos y/o se encargan de varios movimientos en vez de uno solo.



Figura 2.4: Dron Disco de la compañía Parrot volando. (Fuente: www.iee.spectrum.org)

Dependiendo del número de alas, de su configuración y de la disposición de los elementos de control, se pueden diferenciar varios tipos de vehículos de ala fija. La disposición convencional es la que se observa en los aviones comerciales, caracterizados por tener uno o varios motores en la parte frontal, dos alas y una cola. No obstante, se pueden apreciar otros modelos menos habituales, como las alas volantes, las cuales carecen de cola mejorando considerablemente la eficiencia aerodinámica de la aeronave. Además, hacen uso únicamente de unas superficies conocidas como elevones que se encargan del cabeceo y el alabeo a la vez, de este modo se simplifica la parte mecánica a cambio de aumentar la complejidad en el control.

Ala giratoria

Los aviones de ala giratoria se caracterizan por disponer de un rotor que a través de la rotación de sus palas consiguen la sustentación necesaria. De este modo se diferencian dos categorías principales: los helicópteros y los multicópteros.

Los helicópteros disponen de un rotor principal y otro de cola. Este último se encarga de realizar el movimiento de guiñada y de contrarrestar el momento generado por el rotor principal. Para realizar los movimientos de alabeo y cabeceo, modifican el ángulo

de paso y arrastre de las palas mediante el uso de un plato oscilante. Se trata de un complejo sistema mecánico que para el caso de los drones, los hace más frágiles. Además las grandes palas del rotor resultan más peligrosas para el usuario. Por estos motivos, este tipo de dron no es muy común.

Los drones multicópteros se caracterizan por disponer de varios rotores. Normalmente, la nomenclatura de estos vehículos sigue el sistema de numeración latina; así 'tri' denota tres motores, 'cuatri' cuatro, 'hexa' seis y así sucesivamente. Cabe destacar que para el caso de cuatro motores, en castellano se utiliza la palabra 'cuadricóptero' en vez de 'cuatricóptero'. El control de este tipo de drones se consigue variando la potencia suministrada a cada uno de los motores. De este modo se modifican las fuerzas generadas y se puede realizar cualquier movimiento. Por ejemplo, en el caso de un cuadricóptero con una disposición en X de los rotores, si se reduce la potencia de los motores delanteros y se aumenta la de los de detrás, se inclinaría y avanzaría hacia delante. Cabe destacar que todos los rotores no giran en la misma dirección, deben girar en sentido horario y sentido antihorario de manera equitativa. De este modo se compensa el par provocado por el giro de las palas y se evita un movimiento de guiñada no deseado. Se trata del mismo problema que aparece en los helicópteros y que se soluciona con un rotor secundario montado en la cola. Dentro de la categoría de drones multicópteros, los cuadricópteros son los más comunes debido a su sencillez estructural, su seguridad de vuelo y la facilidad para controlarlos. Para construirlo solo se necesita un marco en forma de cruz con los cuatro motores en los extremos, sin mecanismos sofisticados ni enlazados. Además, en el caso de fallo de un motor, el dron aún es capaz de realizar un vuelo controlado y aterrizar evitando daños en su estructura y dispositivos.



Figura 2.5: Dron hexacóptero de la compañía Yuneec modelo Typhoon H Pro. (Fuente: www.latam.pcmag.com)

2.2.2. Aplicaciones de los drones

Dada la reciente diversificación y desarrollo de los drones, estos se han convertido en vehículos con numerosas aplicaciones. En este apartado se analizarán algunas de sus aplicaciones civiles, así se podrá obtener una visión más generalizada y comercial de los drones. Esto resulta especialmente interesante ya que de este modo se podrá diseñar un dron innovador y cualificado que abarque las carencias y deficiencias del resto. De este modo se podrá ofrecer al mercado un dron eficaz que supere a la competencia. Pese a que las posibilidades son innumerables se tratará de clasificar las aplicaciones en unas pocas categorías.

Cartografía e inspección

La cartografía y la inspección es posiblemente una de las aplicaciones más importante para los drones. En el pasado, se requería un avión generalmente de pequeñas dimensiones que sobrevolara la zona, para ello se necesitaban permisos de vuelos y a otra persona capacitada que tomara y montara las fotografías realizadas, con lo cual suponía un gran coste económico. Hoy en día, únicamente se necesita un dron comercial y muy pocos co-

nocimientos para poder realizar dichas fotografías. Cabe destacar que dependiendo del país, existe una normativa que se debe respetar.

En el caso de querer inspeccionar una región grande, sería mejor opción la utilización de un dron de ala fija debido a su mayor alcance y velocidad. No obstante, para áreas más reducidas dónde el vuelo se puede ver limitado por la orografía del terreno, sería más conveniente utilizar un dron multirrotor por su maniobrabilidad y facilidad a la hora de despegar y aterrizar.



Figura 2.6: Ortofotografía realizada con la aplicación *Dronemapper* a partir de varias fotografías. (Fuente: www.conservationdrones.org)

En la cartografía resultan muy útiles las ortofotografías. Se trata de composiciones fotográficas en las que todos los elementos presentan la misma escala y están libres de errores y deformaciones. Se consiguen mediante un conjunto de fotografías aéreas que han sido corregidas para presentar una proyección ortogonal. Solían ser realizadas con aviones tripulados o con satélites que eran capaces de cubrir grandes áreas. No obstante, al ser tomadas a tanta altura suelen ofrecer menor resolución, un píxel de dichas fotografías puede estar abarcando varios metros de superficie. En la actualidad, pueden ser tomadas con drones a menores alturas consiguiendo mayor resolución. Con ayuda de softwares como el *DroneMapper* se pueden crear estos mapas aéreos con gran facilidad reduciendo enormemente los costes.

También, los drones pueden transportar cámaras multispectrales muy adecuadas para la agricultura. Estas cámaras generan imágenes con multitud de longitudes de onda simultáneamente. La fotografía multispectral permite observar la densidad y salud de los cultivos. Los cultivos sanos reflejan mayor cantidad de luz infrarroja cercana. De este modo, y combinándolas con fotografías comunes, el agricultor es capaz de saber que áreas requieren una atención especial. También son útiles para vigilancia forestal, evaluación de impacto ambiental, hidrología etc.

Fotografía y grabación aérea

La fotografía y grabación aérea es la principal aplicación de ocio, no obstante, también tiene gran utilidad en el ámbito empresarial. Se pueden tomar fotos de gran calidad a precio muy inferior a los que supondrían utilizar un helicóptero o un avión. Se utilizan en películas dónde el dron puede acercarse más a los objetos, personas y al suelo. También se utilizan en el sector publicitario y televisivo para realizar tomas aéreas de productos, edificios o lugares. Hoy en día la automatización de los sistemas de navegación de estos vehículos consiguen que este tipo de fotografía resulte muy sencilla y económica, por ello, existen empresas que ofrecen servicios de fotografías haciendo uso de drones.

Vigilancia

La vigilancia es similar a la fotografía y grabación aérea pero centrándose en los acontecimientos que suceden en tiempo real. Son utilizados principalmente por los servicios

públicos como los de emergencia. Los bomberos los utilizan para obtener información sobre el estado y tamaño de un incendio, la policía para obtener una visión aérea de una zona de conflicto, los servicios de rescate para encontrar personas perdidas etc. La mayoría de estas aplicaciones hacen uso de drones multirrotores, ya que son capaces de despegar y aterrizar con mayor facilidad y por lo tanto los hace más rápidos y cómodos. No obstante, para supervisión prolongada se hace uso de drones de ala fija capaces de mantener el vuelo durante más tiempo y recorrer mayores distancias.

Correo

Una de las aplicaciones más recientes es la entrega de correo y paquetes a través de drones. La conocida empresa Amazon realizó en 2016 la primera entrega a domicilio con el uso de un dron. No obstante, este proyecto sigue en vías de desarrollo debido principalmente a las regulaciones existentes, al tráfico aéreo y a la seguridad requerida para poder sobrevolar zonas urbanas y densamente pobladas. Otra gran limitación es que la mayoría de los drones no pueden volar largas distancias lo que limita su rango de entrega. Además, estos drones tienen una fuerte dependencia al sistema de GPS, con lo cual, si este falla, todos los drones serían incapaces de conocer su localización. A pesar de todas estas las dificultades, la entrega aérea podría suponer un gran impacto para la sociedad por su facilidad, rentabilidad y porque podría llegar a sustituir el sistema tradicional de reparto.



Figura 2.7: Dron de la compañía de correo Amazon. (Fuente: www.amazon.com)

Carreras

En los últimos años se ha desarrollado un nuevo y espectacular deporte tecnológico, las carreras de drones. La comunidad aficionada a este deporte crece día tras día, en la actualidad existen cada vez más ligas nacionales e internacionales. Se trata de carreras de cuadricópteros pilotados a través de una señal de vídeo. Los pilotos hacen uso de unas gafas o pantalla que muestran las imágenes captadas por una cámara que dispone el dron. Los drones alcanzan velocidades de hasta 150 km/h , además pueden realizar acrobacias y sortear impedimentos. En muchas de las carreras se debe serpentear entre obstáculos, atravesar aros o rebasar obstáculos.

2.3 Anatomía de los drones

Tras analizar la evolución de los drones y sus aplicaciones, se centrará el estudio en su composición. De este modo, se fabricará un dron que contenga todos los componentes necesarios para hacerlo operativo y óptimo en el ámbito que elegido. En esta sección se profundizará sobre los posibles elementos que pueden conformar un dron en la actualidad.

2.3.1. Estructura

En primer lugar es imprescindible estudiar la estructura de los drones. Se trata de un elemento de vital importancia para el vehículo ya que de su diseño dependerá su resistencia, su peso, la configuración de sus elementos y la protección de los mismos.

Marco multirrotor

El marco multirrotor es la estructura principal de los drones multicópteros, realiza la misma función que el chasis en un coche. Estos marcos pueden ser de diferentes materiales como madera, fibra de carbono o plástico. Deben ser materiales ligeros, resistentes y preferiblemente fáciles de reparar. Actualmente, el desarrollo de máquinas como las de corte por láser o las impresoras 3D han facilitado su fabricación. Además el marco definirá entre otros factores, la situación y separación de los motores, los cuales influyen en el comportamiento aerodinámico y en el control del dron multicóptero.

Principalmente, están compuestos por una placa central y unos brazos. Las placas centrales deben ser suficientemente espaciosas para poder montar el equipo electrónico requerido. Algunos drones disponen de varias placas situadas una encima de otra para poder aumentar este espacio o para proteger el equipo. Por otro lado, en el extremo de los brazos se situarán los motores. Aunque normalmente se sitúa un único motor por brazo, existe la posibilidad de situar uno en la parte superior y otro en la parte inferior en configuración "push-pull". De este modo se consigue mejor planta propulsora sin el peso adicional que supondría un mayor número de brazos. Los brazos pueden tener diferentes formas: cuadrada, cilíndrica, superficie plana, etc. Además, pueden ser plegables lo cual facilita enormemente su transporte pero aumenta el peso y requiere mecanismos relativamente complejos que pueden romperse.



Figura 2.8: Marco multirrotor de un dron.
(Fuente: www.madridgadgetstore.com)

Fuselaje

El elemento principal que caracteriza a los drones de ala fija es el fuselaje. En el caso de estos vehículos, el fuselaje realiza la función de estructura y a su vez otorga el carácter aerodinámico. Los principales materiales elegidos para fabricarlos son madera de balsa, fibra de carbono, fibra de vidrio y espuma siendo este último el más popular por su

reducido coste, fácil reparación y bajo peso. Existe también la posibilidad de combinar varios de estos elementos para mejorar la robustez. A la hora de diseñar el fuselaje es muy importante definir un área de carga útil que contendrá el equipo.

Dado que la estructura define la disposición de los elementos del dron, a la hora de diseñarla se debe tener en cuenta la posición del centro de gravedad y el centro aerodinámico. El centro de gravedad es aquel punto dónde podemos aplicar la totalidad del peso del avión de tal forma que el momento respecto a cualquier punto es el mismo que el producido por toda la masa que constituye el cuerpo. Por otro lado, el centro aerodinámico requiere una explicación un poco más compleja que se mostrará más adelante. Por ahora solo se debe saber que está ligado con el diseño y la configuración de las alas. Lo más importante es que el centro de gravedad esté situado por delante del centro de aerodinámico de este modo la aeronave dispondrá de una estabilidad natural.

Cabe destacar que para el caso de los drones de ala fija se necesita implementar servos en las alas y/o fuselaje para poder mover las superficies de control aunque también pueden realizar otras tareas como inclinar una cámara. Los servos o servomotores están formados por un motor, una caja reductora y un circuito de control. Se caracterizan por ser capaces de ubicarse y mantenerse en una posición dentro de un rango de operación, además, se pueden controlar tanto en velocidad como en posición.

Tren de aterrizaje

El tren de aterrizaje es el elemento que realizará el primer contacto con el suelo tras el aterrizaje. Aunque técnicamente no es obligatorio, su implementación es muy recomendable. Dependiendo del tipo de dron se utilizará un tren de aterrizaje u otro.



Figura 2.9: Avión de radiocontrol con tren de aterrizaje en disposición convencional. (Fuente: www.easyrc.com)

Para el caso de los drones de ala fija, suelen estar formados por pequeñas ruedas ancladas a la parte inferior del fuselaje. Para este tipo de dron, mayoritariamente son estructuras fijas, pero también existen los trenes de aterrizaje retráctiles de mayor complejidad y peso. Otros no utilizan tren de aterrizaje, despegan siendo lanzado con la mano y aterrizan directamente sobre superficies deslizantes como la hierba.

En el caso de los drones multirrotores, el tren de aterrizaje tiene como objetivo principal proteger los elementos del dron. Suelen ser un conjunto patas situadas en

la parte inferior del marco, de este modo al aterrizar se evita que las partes más valiosas del dron contacten con el suelo y sufran algún daño.

2.3.2. Electrónica

El otro aspecto importante de los drones es la electrónica. Estos vehículos requieren un complejo sistema de sofisticados componentes electrónicos para operar. Este sistema es el encargado de recibir la información y procesarla para conseguir un vuelo estable y teledirigido y para controlar los posibles elementos adicionales de los que disponga el dron.

Controladora de vuelo

La controladora de vuelo es el principal componente del sistema de piloto automático. Es imprescindible para cualquier dron. Recibe información de sensores y la transmiten a los actuadores para poder hacer posible el vuelo. En el mercado actual existen muchos modelos disponibles con lo cual, elegir uno puede resultar complicado. Por ello, es importante tratar algunas de las características generales clave de las controladoras de vuelo y entender cómo funcionan. Algunas de ellas sólo son utilizadas para mantener la aeronave estable mientras el piloto controla a distancia el vehículo, otras sirven para que el dron pueda operar de manera totalmente autónoma. Otra característica importante de las controladoras de vuelo es que son capaces de definir diferentes modos de vuelo. Esto puede resultar interesante para los drones que necesiten operar en diferentes ámbitos o con diferentes objetivos. Respecto a los sensores que incluyen, existen controladoras que únicamente disponen de los esenciales como un acelerómetro y un giroscopio mientras que otras son capaces de implementar GPS. A continuación se mostrarán y analizarán de manera general algunos de los sensores más comunes:



Figura 2.10: Controladora para dron de carreras. (Fuente:www.seriouslypro.com)

- **Acelerómetros y giroscopios**

Estos dos sensores son los más importantes de la unidad de control de vuelo, ya que son capaces de medir el ángulo y la rotación del aeronave. De este modo, la aeronave es capaz de saber su actitud de vuelo en todo momento, es decir, puede saber si está cabeza abajo, orientado hacia arriba, alabeada hacia la derecha etc.

Por un lado, el acelerómetro es un dispositivo que mide fuerzas de aceleración tanto dinámicas como estáticas. Están compuestos por unas placas capacitivas y son capaces de detectar vibraciones y el movimiento. Al aplicar una fuerza de aceleración las placas se mueven ocasionando una variación en su capacitancia. A partir de estos cambios se puede determinar la aceleración.

Por otro lado, el giroscopio contiene una pequeña masa que se desplaza con cambios en la velocidad angular. Este movimiento genera señales eléctricas de baja intensidad que tras ser amplificadas son leídas por el microcontrolador.

- **Barómetro**

El barómetro es un sensor de presión. Según la altura en que se sitúe el dron, la presión del aire varía. Por ello, estos sensores son utilizados para conocer la altitud del vehículo. Hoy en día, existen barómetros muy sensibles capaces de medir cambios de centímetros de altitud. No obstante, no son siempre precisos calculando la altitud absoluta con el nivel del mar, por ello, suelen combinarse con un sensor GPS consiguiendo una mejor estimación.

- **GPS**

El GPS (siglas de *Global Positional System*) es un sistema de los Estados Unidos que permite conocer la posición de un objeto en cualquier punto del planeta. Funciona mediante una red de 24 satélites en órbita sobre el planeta Tierra. Implementar un módulo GPS permite que el dron sea capaz de conocer su posición con gran exactitud todo el tiempo. Este módulo es indispensable si queremos el dron se mueva de forma autónoma. De este modo, se puede al dron una ruta para que la recorra o se le puede pedir que vuelva al punto de despegue por sí solo.

- **Magnetómetro**

El magnetómetro se trata de un sensor de brújula que mide el campo magnético. De este modo, permite al controlador saber en que dirección se mueve el dron. Suelen ir instalados en el módulo de GPS.

- **Sensores de distancia**

Los drones pueden incorporar sensores de distancia. Se implementan principalmente por motivos de seguridad, para evitar colisión con obstáculos etc. La mayoría se basan en los ultrasonidos, constan de un emisor que emite la señal y un receptor que la recibe, midiendo el tiempo que tarda en recibir la señal ultrasónica se puede conocer la distancia del objeto. Algunos funcionan utilizando un láser en vez de ultrasonidos, de dicho modo se consigue mayor precisión, no obstante son sensores más caros.

- **Módulo de alimentación**

Los módulos de alimentación son sensores de tensión que filtran la tensión suministrada desde la batería a la controladora de vuelo evitando subidas que puedan dañar la controladora. Además, algunos son capaces de medir la batería que le queda al dron. Procesando esta información algunas controladoras estiman el tiempo de vuelo restante y son capaces de tomar el control del dron de manera automática y volver al lugar de despegue antes de que se termine la batería.

Radiocontrol

Aunque los drones técnicamente deberían ser capaces de volar de manera totalmente autónoma, el radiocontrol es una parte fundamental de cualquier aeronave no tripulada ya que de este modo se es capaz de controlarla manualmente y a distancia en todo momento. Están compuestos principalmente por un transmisor que emite señales de radio y un receptor situado en el dron que las recibe:

- **Transmisor de radiocontrol**

El transmisor radiocontrol dispone principalmente de dos palancas con las que se gestiona el acelerador y los movimientos característicos de las aeronaves: guiñada, alabeo y cabeceo. También tiene otros interruptores con los que se realizan otras funciones como controlar el movimiento de la cámara, desplegar el tren de aterrizaje o cambiar a otro modo de vuelo.

Existen mayoritariamente dos modos posibles que definen el orden de las palancas de control primario en los transmisores de radiocontrol, el modo 1 y el modo 2. No deben confundirse con los modos de vuelo. Un radicontrol modo 2 es la configuración más popular. Controla la guiñada moviendo la palanca izquierda horizontalmente y el acelerador desplazándola verticalmente. El cabeceo y el alabeo son controlados con la palanca derecha con el movimiento vertical y horizontal respectivamente. En el modo 1 se invierten los controles entre la guiñada y el acelerador y entre el cabeceo y el balanceo.

Cada radiocontrol dispone de un número de canales y cada canal corresponde a un control individual. Para hacer volar un dron se requieren normalmente 5 canales de modo que puedan controlarse el acelerador y los movimientos de guiñada, alabeo y cabeceo y además poder cambiar el modo de vuelo. Sin embargo, es común tener más canales para realizar otras funciones como tomar una foto con la cámara o ordenar al dron que vuelva de manera autónoma al lugar de despegue. Antes de realizar cualquier vuelo es importante comprobar que todos los canales están correctamente configurados ya que los transmisores de radiocontrol tienen la capacidad de invertir canales y esto podría ocasionar un accidente.

- Receptor de radiocontrol

El receptor de radiocontrol es un módulo situado en la aeronave y conectado a las entradas del piloto automático, que también le proporciona la alimentación.

Al igual que los transmisores, disponen de un número de canales. No es necesario que tenga el mismo número de canales que el transmisor. Se puede utilizar un transmisor de 8 canales y utilizar un receptor con 5 canales para un dron ya que que son más baratos.

Los receptores de radiocontrol disponen de una antena que establecerá la solidez y el rango de conexión. Es importante situarla lo más lejos posible de otros elementos electrónicos que puedan generar interferencias. Otro aspecto a tener en cuenta es que la fibra de carbono puede bloquear la señal de radio, por tanto, en los drones fabricados con este material, la antena debe situarse en la parte inferior del marco multirroto.



Figura 2.11: Transmisor modelo FlySky con 6 canales y frecuencia de 2.4 GHz. (Fuente: www.rctecnic.com)

Hoy en día, la gran mayoría de las transmisiones de radiocontrol suelen transmitirse por la banda de 2.4 GHz. Esto es debido a que esta banda de frecuencias presenta mayor fiabilidad y menos consumo de energía que las frecuencias utilizadas antiguamente como la de 35 MHz. Además, actualmente no hay que preocuparse por las interferencias radio que podían aparecer al volar un dron cerca de otro. Los sistemas de 2.4 GHz utilizan el

salto de frecuencia al transmitir las señales. Esto significa que el equipo de radio varía constantemente de frecuencia, puede variar mil veces por segundo. Al estar sincronizados el transmisor y el receptor ambos varían al mismo tiempo de frecuencia y por tanto son muy resistentes a las interferencias ajenas.

Motores

La mayoría de los drones de reducido tamaño utilizan motores eléctricos sin escobillas dado que son más ligeros y presentan una mejor relación empuje/peso. Básicamente, están compuestos por un estator con bobinas dispuestas en un patrón radial y un rotor con imanes fijos. Se aplica corriente a conjuntos específicos de bobinas y de manera coordinada, de este modo se convierten en electroimanes que repelen y atraen los imanes del rotor. Variando la alimentación de estos conjuntos de bobinas se puede controlar la velocidad del motor.

Una característica fundamental de este tipo de motores es el factor KV. Este factor representa las r.p.m del motor por voltio suministrado. De este modo, un motor con 750 KV girará a 750 r.p.m si se le aplica 1 V. Las KV no deben confundirse con las unidades kV (kilovoltio). Motores con bajo KV hacen uso de un bobinado de alambre más fino, se le tiene que suministrar mayor voltaje y utilizan mayor amperaje, con lo cual el motor gira más lentamente pero produce más potencia. Estos motores son adecuados para hélices de mayor tamaño que requieren mayor par motor. Por otro lado los motores de alto KV utilizan un bobinado más grueso, se le suministra menor voltaje y utilizan menor amperaje con lo cual giran más rápidos. Estos motores son idóneos para hélices de menor tamaño.

Otro factor a tener en cuenta es el número de electroimanes en el estator y el número de imanes permanentes en el rotor. Un mayor número de ambos implica una mayor eficiencia para generar par motor, no obstante son más complejos de fabricar y como consecuencia son más caros.



Figura 2.12: Motor Brushless con 18 mm de diámetro de rotor, 4 mm de altura de estator y 2400 KV. (Fuente: www.modeltronic.es)

2.4 Mecánica de vuelo

Una vez hemos estudiado los diferentes elementos que componen de los drones, es hora de profundizar en el vuelo de estos vehículos. A continuación se mostrará las diferentes fuerzas que intervienen en cada uno de los movimientos que realizan los drones. Además, se explicará a grandes rasgos la dinámica que interviene en estos vuelos y en el control que se requiere para controlar estos vehículos.

2.4.1. Drones multirrotores

Dado que existen gran cantidad de modelos de drones multirrotores, se ha elegido un dron cuadricóptero convencional para la explicación. En primer lugar, cabe destacar que los únicos elementos a controlar son los motores y estos, normalmente se encuentran fijos en su estructura. Variando la potencia de los motores se puede variar la velocidad de giro de las hélices y por tanto incrementar o decrementar la fuerza de empuje que ejercen. También se puede cambiar la dirección de giro de cada motor.

Existen tres movimientos principales en los vehículos aéreos a partir de los cuales se puede realizar cualquier maniobra. Estos movimientos se realizan a través de unos ejes cuerpo definidos y se conocen técnicamente por los nombres de *yaw*, *pitch* y *roll* que en castellano son “guiñada”, “cabeceo” y “alabeo” respectivamente. A cada uno de estos movimientos les corresponde un ángulo que hemos definido con letras griegas.

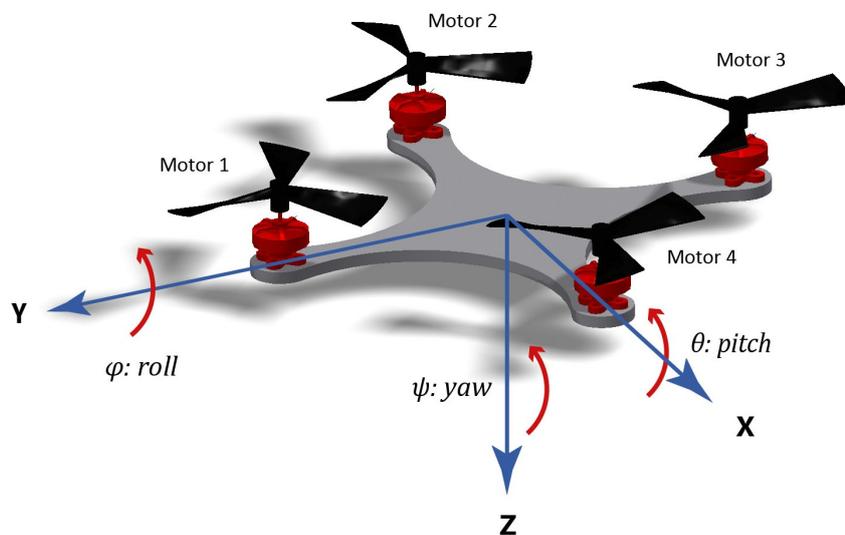


Figura 2.13: Disposición de los ejes en un dron cuadricóptero. (Fuente: Propia)

En este ejemplo los ejes se han situado sobre cada uno de los brazos. Esta disposición corresponde a la de un cuadricóptero en cruz. No obstante, podrían establecerse en cualquier orientación, otra disposición común sería situar los ejes X e Y entre motores y el eje Z perpendicular a la marco. Además, tal y como se puede apreciar en la Fig. (2.13), se ha asignado un número a cada motor para poder referenciarlos de una manera cómoda. El sentido de cada eje y movimiento es el indicado por las puntas de la flecha en la imagen.

Una vez establecidos los ejes y los sentidos positivos podemos proceder a analizar cada uno de los tres movimientos por separado.

Cabeceo

Para realizar el movimiento de cabeceo con sentido positivo basta con suministrar más potencia al motor número 3 y menos al número 1. Esta variación debe hacerse en la misma medida para ambos motores, de este modo las fuerzas seguirán compensando el dron y este se mantendrá estable en una misma altura. Al aumentar la potencia de un motor, su hélice gira más rápido acelerando el flujo de aire y por tanto produciendo más fuerza de empuje. Como consecuencia, se crea un momento que provoca el cabeceo tal y como apreciamos en la Fig.(2.14).

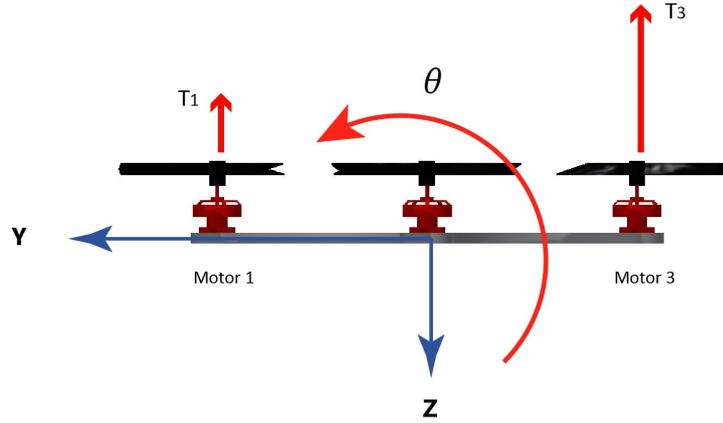


Figura 2.14: Movimiento de cabeceo en un dron cuatricóptero. (Fuente: Propia)

Aplicando la Teoría de la Cantidad del Movimiento (TQM a partir de ahora) y teniendo en cuenta que las fuerzas de empuje han de ser iguales al peso del dron para mantenerlo estable, se tiene la siguiente expresión matemática:

$$\sum_{i=1}^4 T_i = mg \quad (2.1)$$

Por otro lado, si se aplica el Teorema del Momento Cinético (TMC a partir de ahora) al centro de masas y suponiendo que este se encuentra aproximadamente en la intersección de los tres ejes:

$$I_G \dot{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ d \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -T_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -d \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -T_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -d \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -T_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -T_4 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -dT_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -dT_2 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} dT_3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ dT_4 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d(T_3 - T_1) \\ d(T_4 - T_2) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Si los incrementos de potencia en los motores 4 y 2 son de igual magnitud para mantener la estabilidad y altura de dron, la ecuación queda tal que así:

$$\begin{pmatrix} I_{xx} \ddot{\theta} \\ I_{yy} \ddot{\phi} \\ I_{zz} \ddot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d(T_3 - T_1) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Como se puede apreciar según la Ec. (2.4), no habrán momentos en el eje Y. Por otro lado, sí que hay un diferencial de momentos en el eje X que generará una aceleración angular en dicho eje dando pie al movimiento de pitch definido con la siguiente expresión:

$$\ddot{\theta} = \frac{d(T_3 - T_1)}{I_{xx}} \quad (2.5)$$

Tras realizar el movimiento, el dron girará en dicho eje. Como consecuencia, la dirección de la fuerza de empuje de los motores también variará y se dividirá en dos compo-

rientes: una horizontal y otra vertical. La vertical será la que compense el peso y la horizontal provocará el avance del dron en esa dirección. Dado que la componente vertical será menor que la componente original de fuerza, se necesitará suministrar más potencia a todos los motores si se quiere mantener la altura del dron.

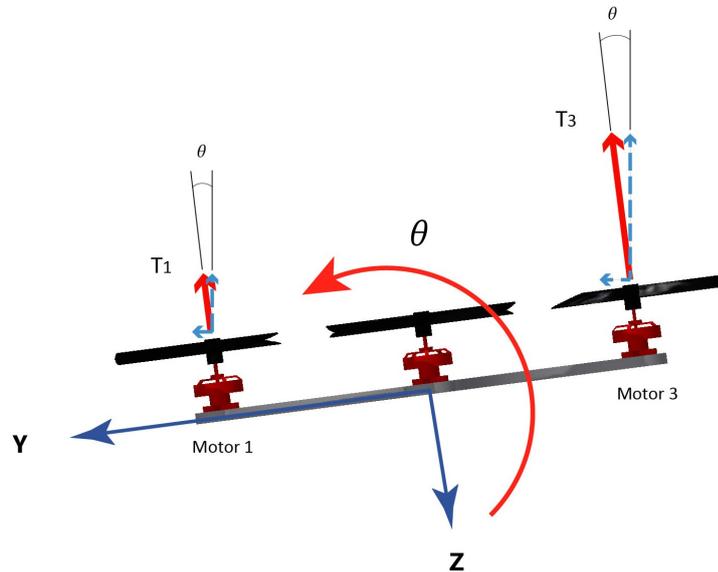


Figura 2.15: Ángulo de cabeceo en un dron cuadricóptero. (Fuente: Propia)

Alabeo

Este movimiento funciona exactamente igual que el de cabeceo pero girando según el eje Y. Para ello, variamos la potencia de los motores 2 y 4.

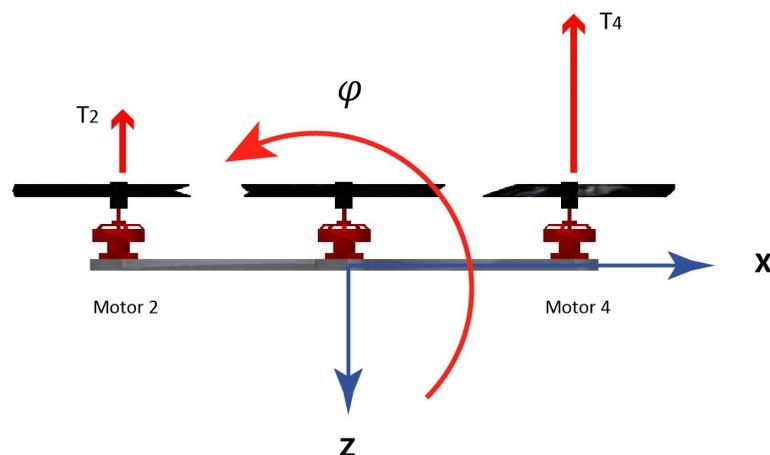


Figura 2.16: Movimiento de alabeo en un dron cuadricóptero. (Fuente: Propia)

En esta ocasión, los momentos se generarán únicamente en el eje Y. Haciendo uso de la TQM y TMC y desarrollando de igual manera que en el movimiento de cabeceo, se obtiene la siguiente expresión matemática:

$$\ddot{\varphi} = \frac{d(T_4 - T_2)}{I_{yy}} \quad (2.6)$$

Al igual que antes, este movimiento genera la aparición de componentes horizontales de fuerza que provocan un movimiento de traslación en dicha dirección.

Guiñada

Este movimiento es completamente diferente a los analizados anteriormente. También es provocado variando el giro de los motores, no obstante, en esta ocasión es necesario variar el giro de todos los motores.

Este movimiento se basa en los momentos rotacionales que genera cada motor. Por tanto, es importante definir su sentido de manera correcta. Para este ejemplo, los motores 1 y 3 girarán con sentido horario y los motores 2 y 4 con sentido antihorario. De este modo se consigue que los momentos se anulen entre sí cuando los motores giran a la misma velocidad y por tanto se evita que el dron gire involuntariamente según el eje Z.

Para este caso, el sentido positivo del giro de eje Z será un giro horario mirando desde arriba del dron. Para generar este giro, hará falta suministrar más potencia a los motores 2 y 4. Además, habrá que suministrar menos potencia a los motores 1 y 3 pero en la misma cantidad. De esta manera se consigue generar el movimiento de guiñada y que la fuerza total de empuje vertical sea la misma y por tanto manteniendo la altitud del dron. Para realizar un giro con sentido contrario, únicamente habría que suministrar más potencia a los motores 1 y 3 y menos a los motores 2 y 4.

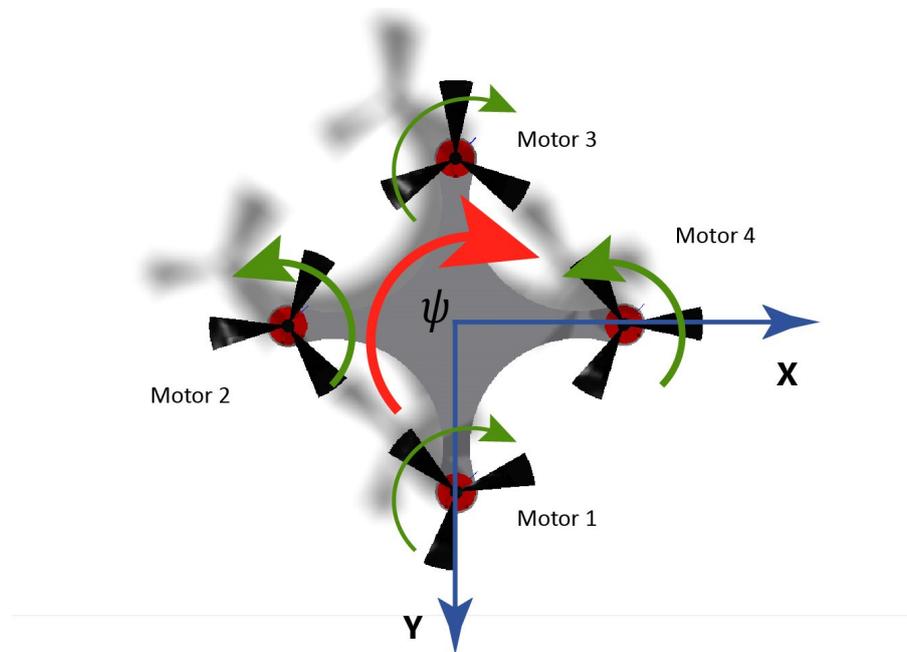


Figura 2.17: Movimiento de guiñada en un dron cuadricóptero. (Fuente: Propia)

El momento que genera la rotación de las hélices puede expresarse del siguiente modo:

$$M_{\varphi} = \sum_{i=1}^4 \tau_i = \sum_{i=1}^4 (I_{zm} \cdot \dot{\omega}_i - \tau_{drag_i}) \quad (2.7)$$

Este momento de guiñada se genera gracias a la suma de los 4 momentos rotacionales. Dado que dos de los motores giran en un sentido y los otros dos giran en el otro, se compensan y el dron queda estable respecto a este giro. Para el resto de drones multirrotores

también hay que definir un sentido de giro que compense este momento. Se observan diferentes disposiciones en la Fig. (2.18).

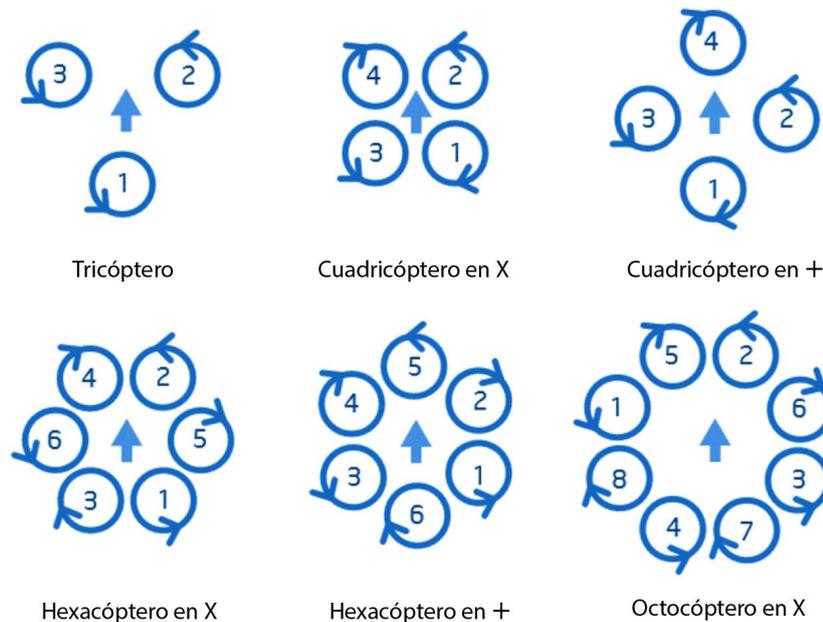


Figura 2.18: Sentido de giro de los motores para diferentes configuraciones de drones multirrotores. (Fuente: www.mydronelab.com)

2.4.2. Drones de ala fija

El otro gran grupo de drones son los de ala fija. Hacen uso de diferentes mecanismos para poder volar. La principal característica que los diferencia de los drones multirrotores, es que los motores únicamente son utilizados para generar una fuerza de avance, no para elevar la aeronave. Además, cabe mencionar que habitualmente los drones de ala fija hacen uso de un único motor con hélices. Por tanto, es obvio que su funcionamiento será distinto.

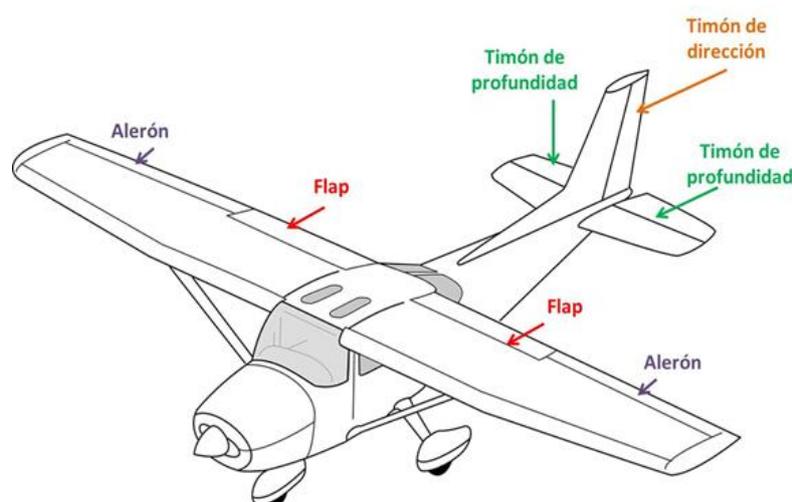


Figura 2.19: Elementos aerodinámicos y superficies de control en un dron de ala fija. (Fuente: www.cursopilotodedrones.net)

Los drones de ala fija utilizan unos elementos aerodinámicos para maniobrar en el aire. Estos elementos son básicamente unas superficies de control. Modificando la con-

figuración de dichas superficies se generan fuerzas aerodinámicas que a su vez generan los movimientos deseados. Al igual que en el caso anterior, se necesita controlar los tres movimientos principales ya mencionados: cabeceo, alabeo y guiñada.

Para comprender el funcionamiento de estos vehículos es primordial diferenciar las principales superficies de control de los que dispone un dron de ala fija convencional. Principalmente hacen uso de alerones, flaps, timón de profundidad (también conocido como timón horizontal) y timón de dirección (también conocido como timón vertical). Haciendo uso de ellos podremos controlar cada movimiento. Cabe destacar que los flaps se utilizan mayoritariamente en el despegue para conseguir mayor sustentación y no para maniobrar. Se aprecia una disposición convencional de estos elementos aerodinámicos en la Fig. (2.19).

Para poder analizar cada uno de los tres movimientos es necesario establecer en primer lugar los ejes de la aeronave y los sentidos positivos de los giros. En esta ocasión, se hace uso del criterio que observamos en la Fig. (2.20).

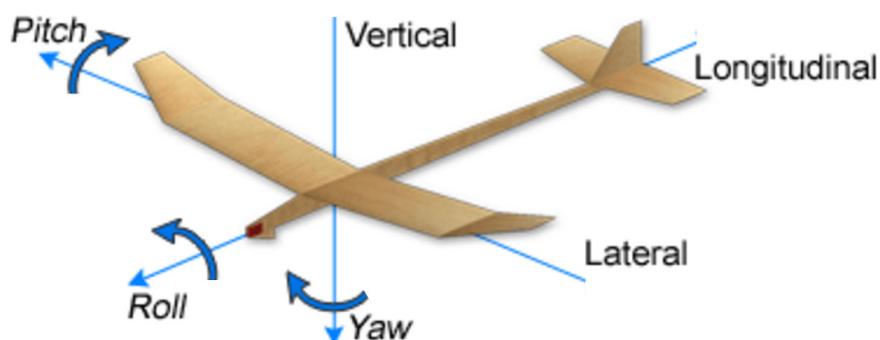


Figura 2.20: Ejes cuerpo en un dron de ala fija. (Fuente: www.whiteboxlearning.com)

Una vez fijados los ejes, se procede en el análisis de cada movimiento por separado:

Cabeceo

El cabeceo de un avión se genera haciendo uso del timón de profundidad. Cuando este se deflecta genera una fuerza de sustentación adicional, la dirección de esta fuerza dependerá del sentido de la deflexión. Si se deflecta hacia abajo, el aire incidirá con un mayor ángulo de ataque y por tanto generará una fuerza de sustentación hacia arriba, por el contrario, si se deflecta hacia arriba generará una fuerza en dirección hacia abajo. Dado que esta fuerza se genera a una distancia considerable del centro de masas del aeronave, aparece un momento que causa el cabeceo. Si se quiere un cabeceo positivo, es decir, "levantar" el morro del dron, se deflecta el timón hacia arriba. Por otro lado, si se requiere "agachar" el morro, se deflecta hacia abajo.

A continuación se profundizará en los fundamentos matemáticos que establecen el movimiento de cabeceo en un aeronave de ala fija y configuración convencional. Observando la Fig. (2.21) se pueden apreciar los principales factores que intervienen en este movimiento.

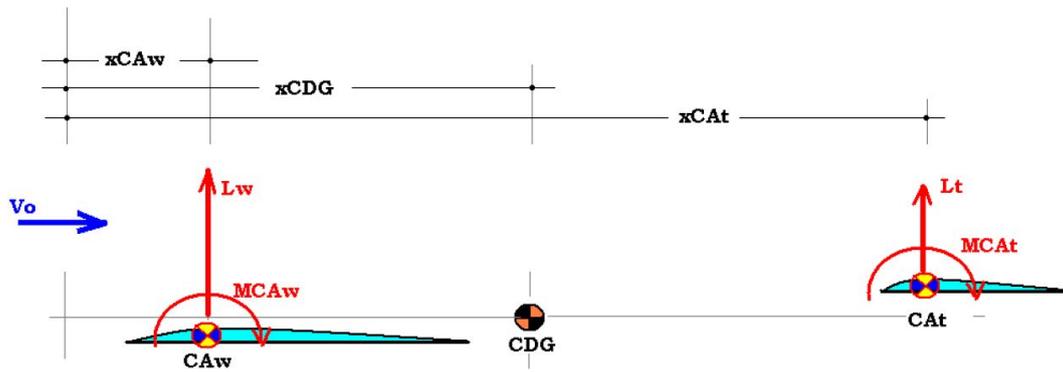


Figura 2.21: Distribución de las fuerzas que intervienen en el movimiento del cabeceo. (Fuente: Doc. [3, Tema 1_A, pág. 13])

Los parámetros de la Fig. (2.21) son los siguientes:

CDG : Centro de gravedad de la aeronave

V_o : Velocidad del flujo incidente

Lw : Fuerza de sustentación generada por el ala

Lt : Fuerza de sustentación generada por la cola

CAw : Centro aerodinámico del ala

$CAAt$: Centro aerodinámico de la cola

$MCAw$: Momento aerodinámico del ala

$MCAAt$: Momento aerodinámico de la cola

$xCAw$: Distancia al centro aerodinámico del ala

$xCDG$: Distancia al centro de gravedad

$xCAAt$: Distancia al centro aerodinámico de la cola

Para entender el movimiento de cabeceo y sus fundamentos matemáticos es necesario comprender el concepto de centro aerodinámico. Para ello en primer lugar se concretan ciertos términos:

- Perfil alar: Sección transversal de un ala.
- Borde de ataque: Punto del perfil alar dónde se separan las líneas de corriente de aire.
- Borde de fuga: Punto del perfil alar dónde se unen las líneas de corrientes provenientes del extradós y el intradós.
- Cuerda aerodinámica: línea recta imaginaria que une el borde de salida con el borde de entrada de un perfil alar.
- Ángulo de ataque: Ángulo que forman la cuerda geométrica con la dirección del aire incidente.

Así pues, el centro aerodinámico se define como aquel punto en el cual el momento de cabeceo no depende del ángulo de ataque. Esto significa que al variar el ángulo de ataque también variará la magnitud de las fuerzas de sustentación y resistencia pero no el momento de cabeceo respecto a este punto.

Retomando y analizando la Fig. (2.21) se observan diversas fuerzas y distancias, lo que ya es un indicativo de cálculo de momentos. Por convenio, dichas distancias suelen

tomarse respecto a un punto imaginario situado en el eje longitudinal del aeronave. Este punto se encuentra en la hipotética intersección resultante de alargar las alas por dentro del fuselaje.

Teniendo en cuenta las fuerzas, distancias y momentos existentes, el momento de cabeceo respecto al centro de gravedad queda establecido:

$$M_{CDG} = M_{CAw} + M_{CA_t} + (x_{CDG} - x_{CAW}) * L_w + (x_{CDG} - x_{CA_t}) * L_t \quad (2.8)$$

Se puede desarrollar la ecuación sustituyendo las fuerzas de sustentación por su expresión matemática:

$$M_{CDG} = M_{CAw} + M_{CA_t} + (x_{CDG} - x_{CAW}) \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S_w CL_{\alpha_w} \alpha \right) + (x_{CDG} - x_{CA_t}) \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S_w CL_{\alpha_t} \left(\alpha \left(1 + \frac{d\epsilon}{d\alpha} \right) + \delta_E \right) \right)$$

En esta última ecuación se ha tenido en cuenta el ángulo de deflexión del timón de cola y un efecto aerodinámico conocido como "downwash" con el cual, el ala principal desvía el flujo de aire provocando que el flujo incida con menor ángulo de ataque en la cola.

Alabeo

El movimiento de alabeo se basa en el mismo principio que el movimiento de cabeceo. Se trata de crear una asimetría controlada en la distribución de la sustentación para que la variación de fuerzas genere un momento y como última consecuencia un movimiento.

Para este caso, las superficies que se encargan del movimiento son los alerones. Al igual que el timón de profundidad, se trata de superficies móviles que pueden modificar su disposición. Dichas superficies se encuentran situadas en los extremos de las alas y en el borde de fuga de las mismas. Suelen funcionar de manera asimétrica, cuando una se levanta, la otra baja y viceversa.

Si se levanta el alerón del ala derecha y se baja el de la izquierda, disminuye la sustentación en el ala derecha y aumenta en el ala izquierda. De este modo, la aeronave alabea en sentido horario si se mira en la misma dirección que el morro. Moviendo los alerones del modo contrario se produciría el efecto inverso. Este movimiento se aprecia gráficamente en la Fig. (2.22).

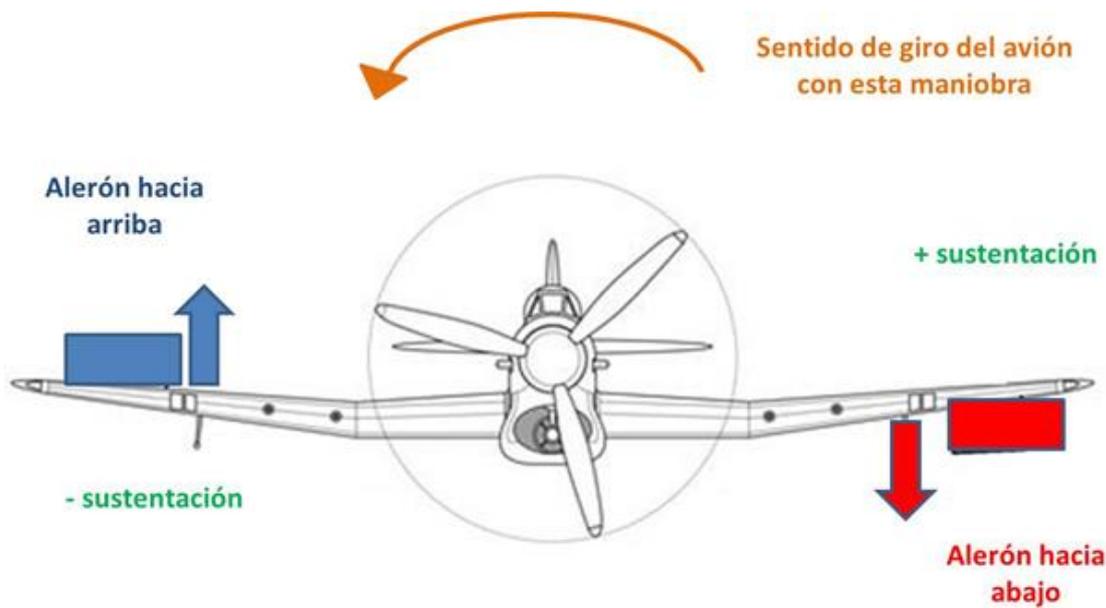


Figura 2.22: Movimiento de alabeo en un dron de ala fija mediante uso de los alerones. (Fuente: www.cursopilotosdedrones.net)

Este movimiento presenta una complejidad matemática mucho mayor que el anterior, por este motivo únicamente se presentan las ecuaciones matemáticas fundamentales de partida obtenidas del Doc. [3]. Se obtienen a partir de un análisis de fuerzas generales en las diferentes direcciones y de las superficies de control que las generan.

$$\Delta Y = \frac{1}{2}\rho S V_0^2 (C_{Y_\beta} \Delta\beta + C_{Y_{\delta R}} \Delta\delta R + C_{Y_{\delta A}} \Delta\delta A + C_{Y_r} \left(\frac{b}{2V_0}\right) \Delta r + C_{Y_p} \left(\frac{b}{2V_0}\right) \Delta p) \quad (2.9)$$

$$\Delta L = \frac{1}{2}\rho b S V_0^2 (C_{l_\beta} \Delta\beta + C_{l_{\delta R}} \Delta\delta R + C_{l_{\delta A}} \Delta\delta A + C_{l_r} \left(\frac{b}{2V_0}\right) \Delta r + C_{l_p} \left(\frac{b}{2V_0}\right) \Delta p) \quad (2.10)$$

$$\Delta N = \frac{1}{2}\rho S V_0^2 (C_{N_\beta} \Delta\beta + C_{N_{\delta R}} \Delta\delta R + C_{N_{\delta A}} \Delta\delta A + C_{N_r} \left(\frac{b}{2V_0}\right) \Delta r + C_{N_p} \left(\frac{b}{2V_0}\right) \Delta p) \quad (2.11)$$

Dónde:

- C: Coeficiente
- Y: Fuerza Lateral
- L: Momento de alabeo
- N: Momento de guiñada
- A: Alerón
- δ : Ángulo de deflexión
- R: Rudder (Timón vertical del cola)
- p: Ángulo de alabeo
- r: Ángulo de guiñada

Con estas ecuaciones y ecuaciones de equilibrio de fuerzas se puede establecer un sistema que permite analizar los movimientos de alabeo y guiñada.

Guiñada

Al igual que en los otros dos movimientos, este se basa en los mismos fundamentos aerodinámicos. En este caso, hace uso de una superficie de control conocida como timón de dirección. Está situado en el timón vertical de cola tal y como se aprecia en la Fig. (2.19).

Esta superficie de control puede deflectarse en ambas direcciones. Al hacerlo, el aire incide con un ángulo de ataque sobre dicha superficie generando una fuerza. Se trata por así decirlo, de una fuerza de sustentación pero en el plano horizontal de la aeronave. Dado que la cola se encuentra situada lejos del centro de gravedad, la fuerza genera un momento y por tanto, un movimiento. Se puede apreciar el movimiento en la Fig. (2.23).

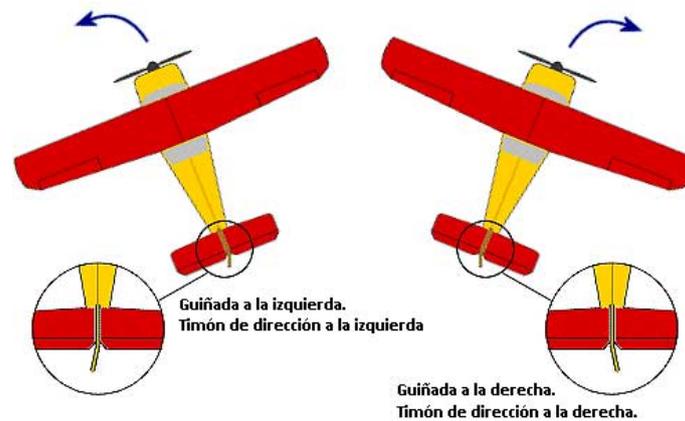


Figura 2.23: Movimiento de guiñada mediante uso del timón de dirección. (Fuente: www.takeoffbriefing.com)

Las ecuaciones que definen este movimiento son las Ecs. (2.11) que también describen el movimiento de alabeo.

CAPÍTULO 3

Diseño

3.1 Estudio preliminar

Una vez realizado el análisis general de las prestaciones y tipos de drones existentes en la actualidad es hora de empezar a idear el diseño del dron.

Se debe tener en cuenta el objetivo de diseñar un dron con un lugar en el mercado actual. Para ello, tras haber estudiado las diferentes aplicaciones y las prestaciones que presenta cada tipo de dron se puede empezar a establecer las características de la aeronave que se pretende construir. Además, otro objetivo es realizar un vehículo innovador. De este modo se tratará de combinar ambas ideas con el fin de fabricar un dron moderno y eficaz.

Se barajaron diferentes ideas, sin embargo la mayoría fueron desechadas. Únicamente se analizaron con mayor profundidad dos ideas. La primera, consistía en fabricar un dron cuadricóptero anexo a un globo de helio. De este modo, la aeronave requeriría menos energía para alzar y mantener el vuelo y por tanto tendría mayor autonomía. No obstante, el volumen del globo supondría una enorme carga aerodinámica que reduciría enormemente la maniobrabilidad del vehículo. Además, el manejo de este tipo de gases puede resultar costoso y en ocasiones peligroso. Por estos motivos la idea fue descartada.

La segunda idea fue la que se ha llevado a cabo. Se pensó en implementar alas a un dron cuadricóptero. Este planteamiento buscaba conseguir un vehículo que combinara las ventajas que presentan los drones de ala giratoria y los de ala fija. Mientras que los cuatro rotores otorgarían al vehículo de gran maniobrabilidad, las alas permitirían que el dron volara a mayor velocidad. Además, las alas generan una fuerza de sustentación que ayudaría a mantener el vuelo con lo que se reduciría el consumo eléctrico y por tanto se aumentaría la autonomía. Cabe destacar que estas ventajas aún siendo fundamentadas, son teóricas y por tanto pueden diferir de la realidad. Además, este proyecto presenta una dificultad adicional de diseño ya que se deben tener en cuenta los aspectos aerodinámicos que implica la implementación de las alas.

Una vez establecidas las características generales del dron se debe realizar una búsqueda en el mercado actual para analizar otros drones con características semejantes. Dado el carácter innovador del proyecto, esta tarea resulta complicada. En el mercado actual únicamente existen dos modelos de drones cuadricópteros que llevan alas. No obstante, se han estudiado otros drones para poder adquirir una mejor visión sobre los parámetros y para poder equiparar sus prestaciones.

Para realizar un estudio equilibrado se han analizado en total seis drones que se pueden clasificar en tres grupos diferentes: drones cuadricópteros, drones de ala fija y drones combinados. Se presentan a continuación ordenados de menor a mayor tamaño:

Parrot Swing



Figura 3.1: Dron cuadricóptero con alas modelo Parrot Swing. (Fuente: www.Parrot.com)

El Parrot Swing es un minidrone capaz de volar en modo horizontal y modo convencional. Tiene un diseño de cuadricóptero en X con unas alas situadas en los brazos. Puede ser controlado con el transmisor de la compañía llamado Parrot Flypad o puedes hacerlo con un smartphone o tablet. Se trata de un vehículo de muy fácil manejo pensado para el ocio. Puede realizar un aterrizaje y despegue vertical y también volar como un avión. Además, cuenta con un dispositivo que emite y recibe señales de ultrasonidos con el fin de evitar posibles colisiones.

Spark



Figura 3.2: Dron cuadricóptero modelo Spark. (Fuente: www.Apple.com)

Spark es un dron de pequeñas dimensiones que cuenta con todas las tecnologías de la famosa compañía DJI. Sus buenas prestaciones y su atractivo diseño lo han convertido en el minidron para *amateurs* por excelencia. Cuenta con diferentes opciones de control inteligente para que su pilotaje sea lo más sencillo y cómodo posible. También cuenta con una cámara de alta resolución sujeta con un gimbal mecánico que permite tomar fotografías desde cualquier ángulo. Además tiene un rango de 2 km y una velocidad de vuelo de hasta 50 km/h.

Parrot Bebop



Figura 3.3: Dron cuadricóptero con alas modelo Parrot Swing. (Fuente: www.Parrot.com)

El Parrot Bebop 2, es el resultado de más de dos años de diseño. Con un peso de 500 gramos y una autonomía de 25 minutos, es un dron de ocio de última generación. Su gran maniobrabilidad le permiten volar, filmar y tomar fotos al mismo tiempo, tanto en interiores como en exteriores. A pesar de su tamaño, es capaz de soportar vientos con velocidades de hasta 60 km/h y volar a una velocidad máxima también de 60 km/h.

Ebee



Figura 3.4: Dron de ala fija modelo Ebee. (Fuente: www.geosistemassrl.com)

El Ebee es un dron completamente autónomo diseñado para realizar mapas aéreos. Es capaz de tomar fotografías aéreas para ser transformadas en ortofotografías y modelos 3D. Se trata de un dron profesional de muy sencillo manejo utilizado por miles de personas en todo el mundo. Se puede controlar manualmente o programar una ruta determinada. No requiere de catapulta, se lanza con la mano para realizar el despegue. Además, el dron cuenta con una estructura robusta pero muy ligera y es desmontable, lo cuál facilita enormemente su transporte.

Parrot Disco



Figura 3.5: Dron de ala fija modelo Parrot Disco. (Fuente: www.popsi.com)

El Parrot Disco es uno de los drones de ala fija más populares del mercado. Es capaz de alcanzar los 80 km/h y volar hasta 45 min. Dispone de varios modelos con diferentes prestaciones para que el consumidor pueda elegir el que más se le adapte. Está equipado con un piloto automático con el que puede volver al punto de partida automáticamente. Además dispone de una cámara Full HD con la que se pueden tomar fotos y realizar vídeos. Por último, este dron se puede pilotar de forma manual ya que es compatible con la mayoría de transmisores RC del mercado.

X PlusOne



Figura 3.6: Dron cuadricóptero en cruz con alas incorporadas modelo X PlusOne. (Fuente: www.xcraft.com)

El dron X PlusOne es un moderno dron que combina eficientemente las características de los drones de ala giratoria con los de ala fija. Es capaz de despegar y aterrizar de forma autónoma y con gran facilidad y además puede volar en modo horizontal alcanzando velocidades de hasta 100 km/h. Puedes programar rutas con Google Maps para que el dron las realice o puedes hacer que siga tu smartphone con una aplicación de Android. Además se puede controlar con el ordenador portátil o con una tablet.

Cada una de estas aeronaves ha sido analizada obteniendo, parámetros de vuelo, dimensiones y prestaciones entre otros. Todos los datos se recogen en las siguientes tablas (3.1) y (3.2):

| Modelo | Parrot Swing | Spark | Parrot Bebop |
|---|---------------------|--------------|---------------------|
| <i>Peso (g)</i> | 295 | 300 | 500 |
| <i>Velocidad de vuelo (km/h)</i> | 30 | 50 | 60 |
| <i>Superficie Alar (cm²)</i> | 375 | - | - |
| <i>Relación de Aspecto</i> | 2.8 | - | - |
| <i>Cuerda alar (cm)</i> | 11.5 | - | - |
| <i>Autonomía (min)</i> | 8 | 16 | 25 |
| <i>Altura (cm)</i> | 12.7 | 5.5 | 8.9 |
| <i>Envergadura (cm)</i> | 32.5 | 14.3 | 32.8 |
| <i>Longitud (cm)</i> | 12.2 | 14.3 | 32.8 |
| <i>Capacidad de la batería (mAh)</i> | 550 | 1480 | 2700 |
| <i>Núm. de celdas de la batería</i> | 1 | 3 | 3 |
| <i>Voltaje requerido (V)</i> | 3.7 | 11.1 | 11.1 |

Tabla 3.1: Especificaciones de drones semejantes con pequeñas dimensiones.

| Modelo | Ebee | Parrot Disco | X PlusOne |
|---|-------------|---------------------|------------------|
| <i>Peso (g)</i> | 690 | 750 | 1350 |
| <i>Velocidad de vuelo (km/h)</i> | 50 | 65 | 100 |
| <i>Superficie Alar (cm²)</i> | 2625 | 2850 | 1480 |
| <i>Relación de Aspecto</i> | 3.5 | 4.6 | 4.6 |
| <i>Cuerda alar (cm)</i> | 27.4 | 24.7 | 18 |
| <i>Autonomía (min)</i> | 50 | 45 | 20 |
| <i>Altura (cm)</i> | 0 | 12 | 35.6 |
| <i>Envergadura (cm)</i> | 96 | 115 | 82.55 |
| <i>Longitud (cm)</i> | 58 | 58 | 48.60 |
| <i>Capacidad de la batería (mAh)</i> | 2150 | 2700 | 5200 |
| <i>Núm. de celdas de la batería</i> | 3 | 3 | 3 |
| <i>Voltaje requerido (V)</i> | 11.1 | 11.1 | 11.1 |

Tabla 3.2: Especificaciones de drones semejantes de tamaño medio.

En la tabla (3.1) se aprecia que algunas casillas no tienen valor. Esto se debe a que esos modelos de drones no tienen alas, y por tanto, se han omitido los parámetros correspondientes.

Comparamos gráficamente los parámetros más relevantes:

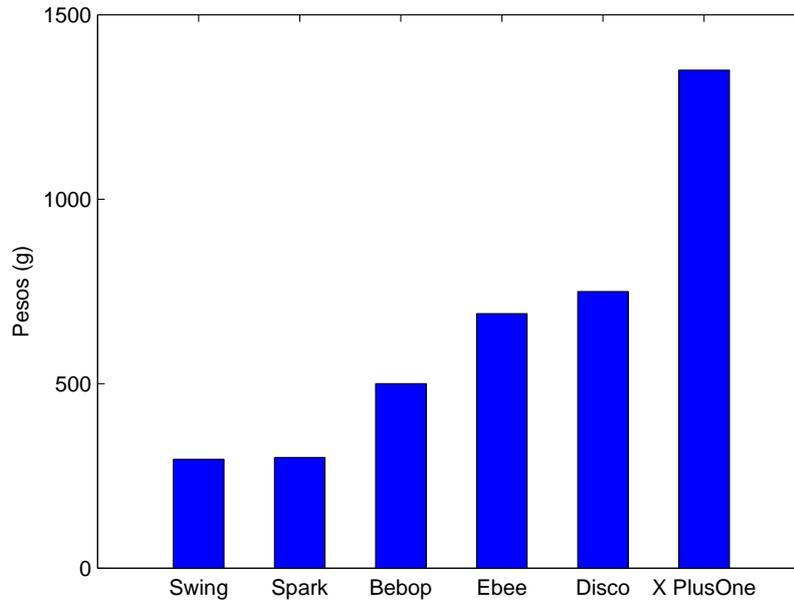


Figura 3.7: Pesos de los drones semejantes. (Fuente: Propia)

Si observamos la Fig. (3.7) podemos observar claramente que el dron X PlusOne tiene un peso muy superior al resto, mientras que el dron Swing tiene el más pequeño. Cabe destacar que precisamente los drones que combinan alas con 4 rotores son los que tienen pesos más diferentes. Estos son que teóricamente serán más semejantes a el dron que se pretende construir. Estos valores tan dispares tendrán que tenerse en cuenta a la hora de fabricar el dron.

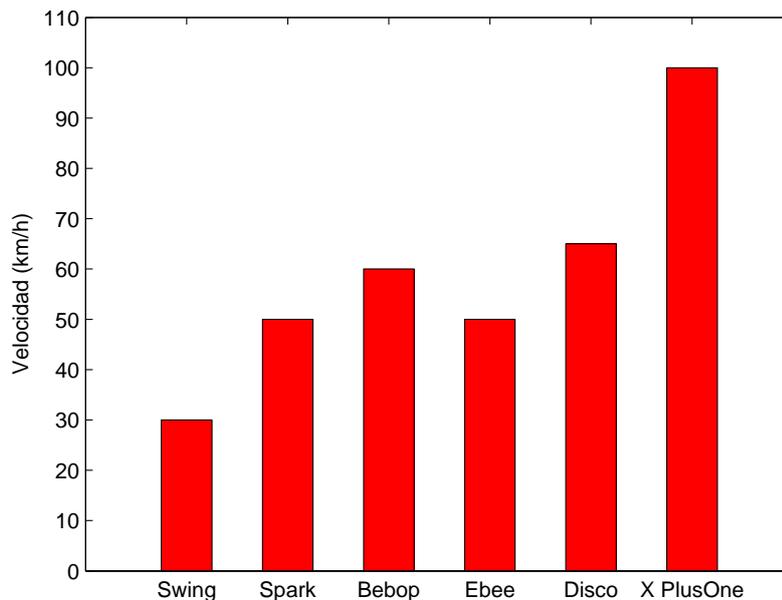


Figura 3.8: Velocidades de los drones semejantes. (Fuente: Propia)

Si se observa la Fig. (3.8) se aprecia claramente que los tres primeros drones presentan velocidades notablemente altas considerando sus pesos. Si además tenemos en cuenta la

velocidad del dron X PlusOne, podemos deducir que los drones cuadricópteros tienen velocidades máximas superiores a los drones de ala fija. Esta afirmación no es absoluta, dado que sólo se han analizado seis drones, no obstante, sigue tratándose de información relevante.

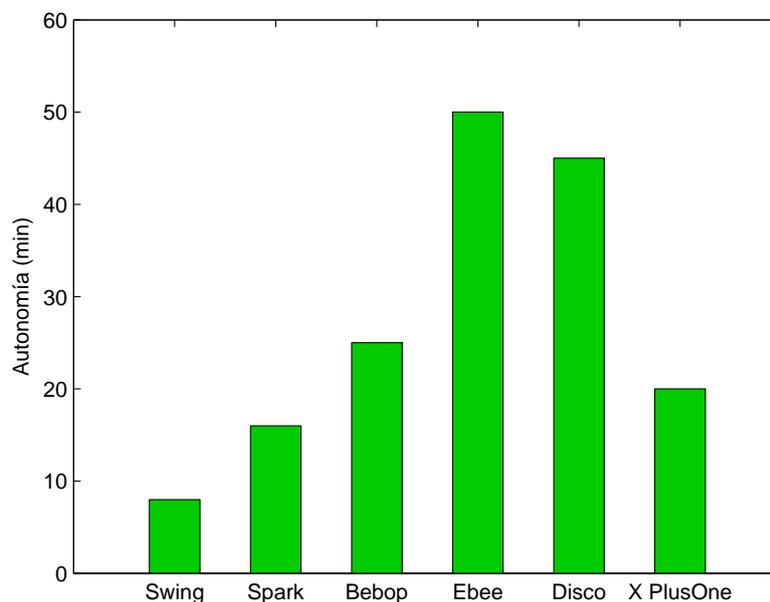


Figura 3.9: Autonomía de los drones semejantes. (Fuente: Propia)

Otra característica fundamental a la hora de analizar drones es la autonomía. En la Fig. (3.9) se aprecian datos muy reveladores. Los drones Ebee y Disco presentan autonomías muy superiores a las del resto. Esto era de esperar ya que se trata de los drones de ala fija. Estos sólo utilizan un rotor y por tanto el consumo energético es menor. Otro dato que cabe mencionar es que el dron X PlusOne tiene una autonomía inferior a la que cabría esperar debido a sus prestaciones. Esto puede deberse a que utiliza motores de gran potencia que a pesar de proporcionarle una alta velocidad de vuelo, requieren también de un alto consumo.

Concluyendo, los drones cuadricópteros presentan velocidades de vuelo superiores mientras que los drones de ala fija tienen mayor autonomía. Esto se debe a que la planta propulsora de los drones cuadricópteros requiere de un alto consumo energético pero a su vez genera un gran empuje que permite al dron volar a altas velocidades. Por tanto, lo ideal sería conseguir un dron que pueda volar a altas velocidades pero maximizando su eficiencia para que su autonomía no se vea reducida considerablemente.

Este dron, sería capaz de abarcar diferentes misiones y aplicaciones. Podría utilizarse para realizar mapas aéreos, para vigilar el estado de las plantas y cultivos en un campo, para vigilancia aérea etc. No obstante, su alta velocidad lo haría excelente para grabar elementos que se desplazan a grandes velocidades. Sería un dron óptimo para la industria cinematográfica dado que podría grabar vídeos a altas velocidades y alturas pudiendo prescindir el uso de una avioneta o helicóptero los cuales suponen un alto coste. Además, dado que se trata de un dron cuadricóptero su fácil manejo lo hace idóneo para los usuarios *amateurs* que quieran volar un dron a altas velocidades o queirán grabar atractivos vídeos aéreos.

3.2 Dimensionamiento

Tras realizar diferentes bocetos y barajar varias ideas, se decidió realizar un diseño de cuadricóptero común con una montura desmontable para las alas. Este diseño permitiría retirar las fácilmente, de este modo, se podría analizar el vuelo del dron con y sin alas y analizar de manera más verosímil los beneficios o los inconvenientes que supondría la implementación de alas. Además, esta configuración permite simplificar el control del dron. Únicamente habría que programar dos modos de vuelo, uno convencional para un dron cuadricóptero ordinario y otro modo de vuelo horizontal.

Se trata de un proyecto experimental y con financiación propia, por ello se ha creído conveniente fabricar un dron de pequeñas dimensiones. En caso de que el proyecto tuviera éxito, se podría realizar un diseño semejante pero de mayor tamaño y así mejorar sus prestaciones.

Peso

El primer parámetro que se ha de definir es el peso. Analizando los modelos estudiados más pequeños, *Swing* y *Spark*, se ha elegido un peso intermedio de 120 g para el dron. Una vez establecido el peso, se debe ir eligiendo los diferentes componentes eléctricos y estimar el peso de cada uno y de este modo, analizar la viabilidad del modelo.

En primer lugar, se ha de elegir unos motores que puedan proporcionar el empuje necesario. Normalmente, los motores son capaces de levantar el peso del dron con un 60 % de su potencia. De modo que se deben elegir unos motores que generen un empuje máximo de:

$$T_{dron} = \frac{120}{60\%} = 200 \text{ g}$$

$$T_{motor} = \frac{T_{dron}}{4} = 50 \text{ g}$$

Realizando una búsqueda por internet y analizando varios modelos de motores *brushless* de este tamaño, se estima un peso aproximado:

$$m_{motor} = 5 * 4 = 20 \text{ g}$$

Tras elegir los motores, se necesita estimar el peso de unas hélices. Teniendo en cuenta el tamaño y el empuje que generan los motores, las hélices no deberían exceder los 7 cm de diámetro. Analizando diferentes modelos de hélices con estas características, se observa que modelos con pesos que oscilan entre 0,3 g y 0,7 g. Teniendo esto en cuenta se estima un peso de:

$$m_{hel} = 0,5 * 4 = 2 \text{ g}$$

A continuación estimamos el peso de los ESC (controladores de velocidad electrónicos) teniendo en cuenta las características de los motores. Estos motores no exceden los 5 A de consumo, por tanto basta con analizar el peso de ESCs de 6 A. Observando diferentes modelos:

$$m_{ESC} = 1 * 4 = 8 \text{ g}$$

El siguiente elemento a tener en cuenta es la controladora de vuelo o FC (*FlightController*) para abreviar. Para un dron de pequeño tamaño existen gran variedad de modelos. Analizando varios de ellos se estima el siguiente peso:

$$m_{FC} = 6 \text{ g}$$

Otro elemento indispensable que llevará el dron es el receptor de radio. Se trata de un componente de muy poco peso y que depende del transmisor de radio que se utilice.

$$m_{rec} = 1 \text{ g}$$

El siguiente paso es estimar el peso de la placa distribuidora o PDB (siglas en inglés de *Power Distribution Board*). Se debe tener en cuenta que se necesita alimentar la placa controladora, los cuatro ESCs y el receptor de radio. Al igual que en los casos anteriores se ha realizado una búsqueda y estimado un peso:

$$m_{PDB} = 7,5 \text{ g}$$

Únicamente queda por estimar un peso de la batería. Este componente es el último que se elige cuando se diseña un dron. Dependiendo del peso que tenga el vehículo y de la autonomía que se requiera se establece el número de celdas. Una vez elegido, se puede calcular el peso de la batería.

Por tanto, el siguiente paso que se debe dar es estimar el peso de la estructura del dron. Dado que se quiere fabricar un dron de reducido peso, se ha elegido madera de modelismo como material para fabricarlo. Esta madera tiene una densidad aproximada de $\rho_{mad} = 800 \text{ Kg}/\text{m}^3$ y un grosor de 3 mm . Las hélices deben tener alrededor de 5 cm de diámetro, por tanto el marco multirrotores tendrá unos 6 cm de lado evitando de este modo que las hélices se toquen. Se calcula la masa de la estructura de la siguiente manera:

$$A_{estr} = 0,06^2 = 3,6 * 10^3 \text{ m}^2$$

$$\rho_{mad} = 800 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$h_{mad} = 3 \text{ mm}$$

$$V_{estr} = A_{estr} * h_{mad}$$

$$m_{estr} = V_{estr} * \rho_{mad} = 8,64 \text{ g}$$

El dron también cuenta con unas alas y con su debido soporte. Para las alas se utilizará una espuma como el poliuretano. Existen diferentes tipos, no obstante, se estimará una densidad aproximada de $55 \text{ kg}/\text{m}^3$. Suponiendo que las alas son bloques finos de tamaño similar a las alas del *ParrotSwing* y que el soporte será ligero pesando alrededor de 5 g :

$$V_{alas} = 2 * (0,1 * 0,16 * 0,005) = 1,6 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$m_{alas} = V_{alas} * \rho_{esp} + m_{soport} = 3,2 * 10^{-4} * 55 + 5 * 10^{-3} = 13,8 \text{ g}$$

Por último, hay que tener en cuenta el peso de los tornillos, tuercas, separadores, adhesivos y cableado. Dado que no se puede saber con exactitud el número que se va a necesitar, se debe hacer una estimación inicial que será poco precisa. En este caso se ha decidido por:

$$m_{\text{torn}} = 4 \text{ g}$$

De este modo, que ya se tiene el peso estimado de todas las piezas del dron exceptuando la batería:

$$\begin{aligned} m_{\text{Total}} &= m_{\text{motor}} + m_{\text{hel}} + m_{\text{ESC}} + m_{\text{PDB}} + m_{\text{FC}} + m_{\text{rec}} + m_{\text{estr}} + m_{\text{alas}} + m_{\text{torn}} \\ &= 20 + 2 + 8 + 7,5 + 6 + 1 + 8,64 + 13,8 + 4 = 70,94 \text{ g} \approx 71 \text{ g} \end{aligned}$$

Dado que se ha elegido un peso para el dron de 120 g tenemos un margen de 49 g para la batería. Se trata de un margen de peso considerable ya que existen modelos de baterías de LiPo con dos celdas apropiados para el drones de reducido tamaño que pesan sobre 35 – 45 g.

Se concluye que el peso del dron estimado es viable ya que el vehículo tendría todos los componentes necesarios para volar. No hay que perder de vista que todos los pesos obtenidos hasta ahora son estimados.

Tamaño

Una vez confirmada la viabilidad del proyecto se puede empezar a establecer el tamaño del dron. El componente dimensional más limitante en un dron cuadricóptero convencional son las hélices. Como se ha mencionado anteriormente se considerará que las hélices tiene un diámetro de 5 cm. Teniendo en cuenta que van situadas en los extremos de las patas, podemos establecer una longitud mínima de 6 cm (de este modo se tiene 1 cm de margen) para cada lado del marco multirroto.

No obstante, este dron no es ordinario, debe disponer de unas alas colocadas perpendicularmente al marco principal. Por tanto, para evitar el contacto de las hélices con las alas se debe aumentar el margen. Dado que las dimensiones de las alas no están establecidas se requiere estimar un espesor alar aproximado. En este caso se ha considerado un espesor de 2 cm. Si se añade un centímetro de margen por cada lado del ala tenemos un espacio entre hélices de 4 cm. Finalmente y teniendo en cuenta que las hélices tienen un radio de 2,5 cm se tiene que cada lado del marco medirá aproximadamente $2 * 2,5 + 4 = 9 \text{ cm}$.

El siguiente parámetro dimensional que se debería establecer es la altura del dron. En este caso el elemento que más se debe tener en cuenta son las alas. Al igual que antes, no se tienen establecidas sus dimensiones y por tanto, la cuerda permanece como una incógnita. Para estimarla se debe observar los drones semejante, en este caso, se aprecia que el dron *Parrot Swing* tiene unas alas de cuerda 11,5 cm. Teniendo en cuenta que la velocidad de este dron debería ser semejante estimamos una cuerda de 10 cm. Por tanto, el dron con las alas tendrá una altura 10 cm como mínimo. La altura del dron sin alas será algo inferior, si se tiene en cuenta que a 1/4 de la cuerda debe estar el CDG del dron, se puede estimar un altura del dron aproximadamente 7,5 cm.

Concluyendo, el dron (sin las alas) tendrá estas dimensiones aproximadas:

$$9 \times 9 \times 7,5 \text{ cm}$$

3.3 Electrónica

El siguiente paso que se debe dar en el proceso de diseño es la elección de los componentes electrónicos. Básicamente, se debe repetir el proceso realizado la sección 3.2 pero en este caso, concretando el modelo de cada componente electrónico.

Motores

Se requiere unos motores que generen una fuerza de empuje total de 200 g por tanto, cada uno debe realizar un empuje de 50 g. Entre los posibles modelos se ha optado por el siguiente:



Figura 3.10: Motor modelo Racerstar Racing Edition BR1103 elegido para el dron. (Fuente: www.racerstar.com)

Sus características son las siguientes:

| Modelo de Motor | Racerstar BR1103 |
|---------------------------------|------------------|
| Número de celdas de batería (S) | 1-2 |
| Alimentación (V) | 1.5-3.7 |
| Corriente continua (A) | 1.5-3.1 |
| Peso (g) | 3.3 |
| Diámetro del eje (mm) | 1.5 |
| Diámetro del motor (mm) | 15.6 |
| Altura (mm) | 1.5 |
| KV (rpm/V) | 8000 |

Tabla 3.3: Características de los motores del dron.

Este modelo opera según estos parámetros:

| Voltaje (V) | Hélices | Corriente (A) | Empuje (g) | Potencia (W) | Eficiencia (g/W) |
|-------------|---------|---------------|------------|--------------|------------------|
| 1.5 | 3020 | 1.5 | 22 | 5.2 | 4.2 |
| 3.7 | 2520 | 3.1 | 55 | 22.3 | 2.5 |

Tabla 3.4: Datos operativos de los motores.

Se debe tener en cuenta que el modelo del motor elegido es el de 8000 KV. Como se puede apreciar en la Tabla (3.4), el motor es capaz de ejercer una fuerza máxima de 55 g. Respecto a las hélices se observa que estos motores utilizan unas 3020 y 2520. Estos números definen el modelo de la hélice, los primeros dígitos establecen el diámetro en pulgadas y las dos últimas cifras hacen referencia al número de paso de las hélices. De este modo, el primer modelo tiene un diámetro de 3,0" y un paso de 20 y el segundo modelo tiene un diámetro de 2,5" y el mismo número de paso.

Las dimensiones y los planos acotados se muestran en la siguiente Figura:

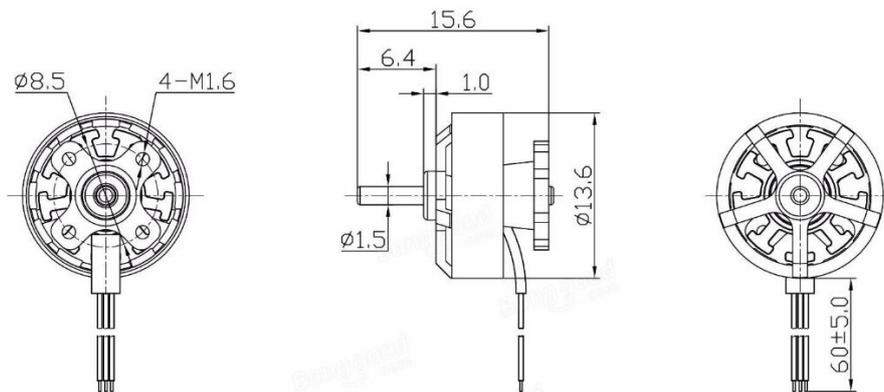


Figura 3.11: Características de los motores. (Fuente: www.racerstar.com)

ESCs

Una vez elegidos los motores se debe elegir unos ESCs adecuados. En este caso se ha seleccionado el siguiente modelo:



Figura 3.12: Controlador electrónico de velocidad del dron modelo Racerstar RS6A V2 6A 1-2S . (Fuente: www.racerstar.com)

Tienen las siguientes características:

| Modelo de ESC | RS6A V2 6A 1-2S |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Número de celdas de batería (S) | 1-2S |
| Corriente continua (A) | 6 |
| Pico máximo de corriente (A) | 10 |
| Peso (g) | 1.1 |
| Tamaño (cm) | 1.8 x 1.1 |
| Protocolos | Oneshot42, Oneshot125 o Multishot |

Tabla 3.5: Datos de los controladores electrónicos de velocidad.

Se ha optado por unos ESCs de la misma compañía que los motores. Funcionan hasta con un máximo de 6 A lo cual es más que suficiente para los motores. También están

diseñados para funcionar con baterías de una o dos celdas, por tanto, se trata de un modelo aceptable.

Hélices

Como ya están establecidos los motores se deben elegir unas hélices adecuadas. Lo primero en lo que hay que fijarse es en que concuerde el diámetro del eje del motor con el de la base de la hélice. Posteriormente se debe definir un diámetro y un paso. Como ya se ha comentado las hélices para motores de este tamaño tienen diámetros que oscilan entre los 5 – 7 cm. Respecto al paso, se ha elegido un valor intermedio de 20. De este modo se han elegido las siguientes hélices:



Figura 3.13: Hélices modelo Racerstar 2030 R-BN55X3 . (Fuente: www.racerstar.com)

Tienen las siguientes características:

| Modelo de Hélices | Racerstar 2030 R-BN55X3 |
|---|-------------------------|
| <i>Diámetro (cm)</i> | 5.5 |
| <i>Núm. de paso (mm/rev)</i> | 30 |
| <i>Pico máximo de corriente (A)</i> | 10 |
| <i>Diámetro de agujero para el eje (mm)</i> | 1.5 |
| <i>Peso (g)</i> | 1.2 |

Tabla 3.6: Datos de los controladores electrónicos de velocidad.

Se ha elegido un modelo de hélices de la misma casa que los motores y ESCs. Además, cabe mencionar que tienen un diseño *Bullnose* caracterizado por unas puntas de pala rectas. Este diseño presenta mejores características aerodinámicas. Por último, el material es un plástico PV que ofrece una buena relación resistencia/peso.

Controladora de vuelo

Una vez definida la planta propulsora del dron se proceder definiendo los componentes eléctricos correspondientes a la parte de control. El primer paso es elegir una FC adecuada. Para ello, se debe tener en cuenta el tamaño y diseño del dron. De este modo se ha elegido el siguiente modelo:

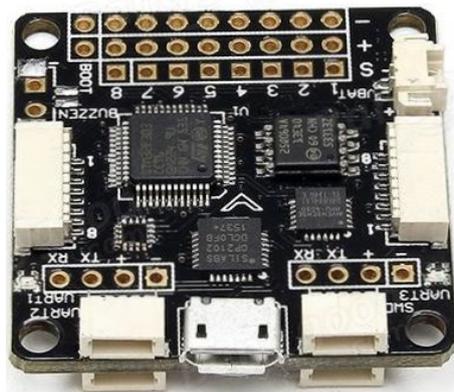


Figura 3.14: Controladora de vuelo modelo F3 Acro 6 DOF/Deluxe 10 DOF . (Fuente: www.banggood.com)

Tiene las siguientes características:

| Modelo de FC | F3 Acro 6 DOF/Deluxe 10 DOF |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| <i>Dimensiones (cm)</i> | 35 x 35 x 6 |
| <i>Diámetro de los agujeros (mm)</i> | 3 |
| <i>Distancia entre agujeros (mm)</i> | 30 |
| <i>Peso (g)</i> | 6 |

Tabla 3.7: Datos de la controladora de vuelo.

Además cuenta con los siguientes elementos:

- CPU modelo STM32F3
- Alta capacidad de memoria *Flash*
- Acelerómetro-giróscopo modelo MPU6050
- Barómetro modelo MS5611
- Magnetómetro modelo HMC5883
- Entrada de MicroUSB

Como se puede apreciar se trata de una controladora completa que tiene todo lo necesario para poder volar el dron. Además, tiene un tamaño reducido lo cual lo hace idóneo para este proyecto.

Placa Distribuidora

A continuación se debe elegir un PDB adecuado. Para ello se debe tener en cuenta principalmente la tensión de alimentación que necesitan los componentes electrónicos. En este caso la FC se alimenta con 5 V y los ESCs con 12 V. También debe tenerse en cuenta su tamaño. De este modo se ha optado por el siguiente modelo



Figura 3.15: PDB modelo Lantian BEC Output 5V 12V 3A. (Fuente: www.banggood.com)

Este modelo cuenta con las siguientes características:

| Modelo de PDB | Lantian BEC Output 5V 12V 3A |
|-------------------------------|------------------------------|
| Batería (S) | 2-3 |
| Tensiones de salidas (V) | 5 y 12 |
| Dimensiones (cm) | 36 x 36 x 3 |
| Diámetro de los agujeros (mm) | 3 |
| Distancia entre agujeros (mm) | 30 |
| Peso (g) | 6 |

Tabla 3.8: Datos de la placa distribuidora.

Se trata de un placa idónea para el dron por diversos motivos. Tiene un tamaño muy similar a la controladora, además los agujeros para sujetarla tienen la misma separación y tamaño, de este modo se pueden poner FC encima de la PDB y sujetar ambas placas con unos separadores y unos tornillos. Dispone de salidas a 5 V y a 12 V con los que alimentar la FC y los ESCs. Por último, es apta para baterías de dos celdas.

Batería

Básicamente, la batería debe cumplir primordialmente dos requisitos: pesar menos que los 49 g estimados inicialmente y debe tener dos celdas para poder alimentar la PDB. Además, se debe tener en cuenta las dimensiones del marco multirroto del dron. Tras barajar diversas opciones se ha elegido la siguiente batería:



Figura 3.16: Batería modelo ZOP Power 7.4V 850MAH. (Fuente: www.banggood.com)

Cuenta con las siguientes características:

| Modelo de Batería | ZOP Power 7.4V 850MAH 2S 25C |
|----------------------|------------------------------|
| Tipo de conector | JST Plug |
| Núm. de celdas (S) | 2 |
| Tensión (V) | 7.4 |
| Capacidad (mAh) | 850 |
| Dimensiones (mm) | 16 x 30 x 53 |
| Tasa de descarga (C) | 25 |
| Peso (g) | 45 |

Tabla 3.9: Datos de la batería.

Como se observa en la Tabla (3.9) la batería cumple con los requisitos mencionados anteriormente.

Emisora y receptor

Los últimos elementos que se necesitan son la emisora y la receptora de radio. Antes de realizarse este proyecto, se disponía de una emisora modelo *FR Sky X9D* por tanto se decidió utilizar este modelo y no comprar otro ya que las emisora tienen un coste elevado.



Figura 3.17: Emisora modelo *FR Sky X9D*. (Fuente: www.elcuelodeldrone.com)

Se trata de una emisora con 16 canales, pantalla LCD retroiluminada, 9 modos de vuelo y 32 interruptores lógicos. Para este proyecto no sería necesario un modelo con tantas prestaciones.

Dado que ya se tiene una emisora, únicamente queda definir el receptor. Principalmente, hay que fijarse en elegir un modelo compatible con la emisora. Además, el receptor va alimentado con la FC por tanto, también hay que comprobar que la alimentación sea la adecuada. En este caso, la FC dispone de una salida alimentada con 5 V. Teniendo ambos requisitos en cuenta se ha elegido el siguiente receptor:

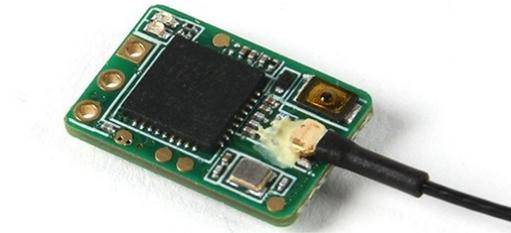


Figura 3.18: Receptor modelo *FR Sky XM*. (Fuente: www.hobbyking.com)

Este receptor cuenta con las siguientes características:

| Modelo de Receptor | FR Sky XM |
|--------------------------------|------------------|
| <i>Protocolo de radio</i> | SBUS |
| <i>Alimentación (V)</i> | 3.7-10 |
| <i>Longitud de antena (cm)</i> | 5 |
| <i>Dimensiones (mm)</i> | 21.5 x 12 x 3.5 |
| <i>Peso (g)</i> | 1.6 |

Tabla 3.10: Datos del receptor.

Este modelo cumple con las necesidades operativas. Se puede alimentar con 5 V y además, para asegurar su compatibilidad con la emisora, se ha elegido un modelo de la misma compañía.

Comprobación de las estimaciones

Antes de proceder, se debe verificar que los pesos reales no discrepan de los estimados ya que si fuer así, podría crear problemas en el diseño. Por ello se ha realizado la siguiente tabla comparativa:

| Componente | Peso Estimado (g) | Peso Teórico (g) | Error (g) |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|
| <i>Motores</i> | 20 | 13.3 | 6.7 |
| <i>ESCs</i> | 8 | 4.4 | 3.6 |
| <i>Hélices</i> | 2 | 4.8 | 2.8 |
| <i>FC</i> | 6 | 6 | 0 |
| <i>PDB</i> | 7.5 | 6 | 1.5 |
| <i>Batería</i> | 49 | 45 | 4 |
| <i>Receptor</i> | 1 | 1.6 | 0.6 |
| Total | 93.5 | 81.1 | 12.4 |

Tabla 3.11: Comparación entre los pesos estimados y los reales.

Cabe mencionar que los pesos mostrados tienen en cuenta el total de los componentes, por ejemplo, en el caso de los motores, los pesos hacen referencia al peso total de los cuatro que tiene el dron.

Si se observa la Tabla (3.11), se puede apreciar que el peso teórico es inferior al estimado lo cual supone una buena noticia ya que se tendrá más margen en el diseño de la estructura y las alas. Cabe destacar que el peso teórico es el que se menciona en las especificaciones del producto, este peso puede discrepar ligeramente del real.

3.4 Estructura

Se ha diseñado la estructura teniendo como principal objetivo que sea ligera pero a la vez suficientemente robusta. Debido a la limitación económica y a que este modelo es experimental, se ha elegido como material para la estructura una madera de contrachapado ligera de tres capas y 3 mm de grosor. Se trata de un material que ofrece prestaciones aceptables de flexibilidad y resistencia y que a su vez es muy ligero. Además, se ha elegido este material porque en un futuro cuándo el proyecto se encuentre consolidado, se podría utilizar los mismos diseños para fabricar la estructura con fibra de carbono. La estructura también cuenta con una varilla de acero que servirá como soporte para las alas. Por último, se ha tratado que la estructura tenga una configuración ergonómica que a su vez pueda adaptarse a una diferente distribución de los componentes o a posibles modificaciones.

3.4.1. Elementos

La estructura cuenta con tres componentes de madera principales y el soporte de las alas. Se describen a continuación:

Marco Multirrotor

El marco multirrotor presenta una forma convencional con diferencia de que se ha añadido un diseño de vaciado en la parte central para reducir su peso. Además, tras bajar diferentes opciones, se ha optado por sujetar la batería con unas gomas elásticas con la ayuda de unas pestañas situados en ambos lados del marco. Esta idea es viable debido a las pequeñas dimensiones del dron y ofrece gran comodidad a la hora de cambiar de una batería a otra ya que se evitaría tener que destornillar y mayores complicaciones. El vaciado que se ha realizado es fruto de diferentes diseños iniciales. Dichos diseños se muestra a continuación y se han realizado con el programa *Inventor*:

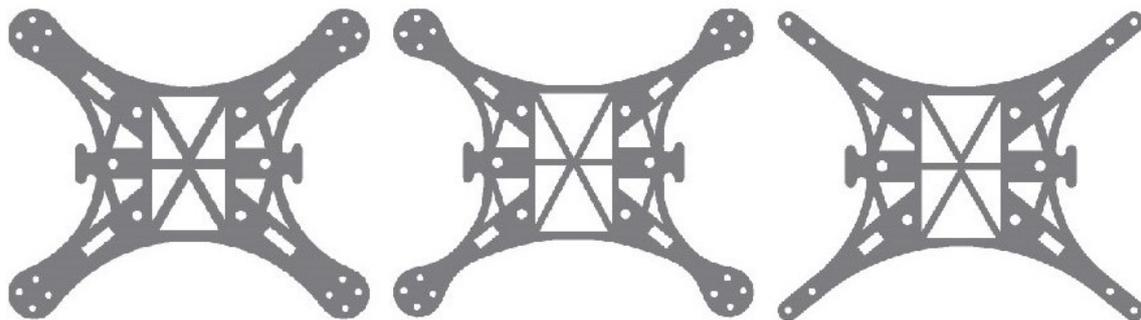


Figura 3.19: Diseños de marcos multirrotor. (Fuente: Propia)

Como se aprecia en la Fig. (3.19), se pueden diferenciar tres modelos diferentes de marcos multirrotor. Están ordenados de izquierda a derecha de mayor a menor peso. El diseño está realizado para que la madera trabaje a tracción en la mayor medida de los posible, dado que este material responde mejor a este tipo de tensiones.

El diseño principal es el mismo para los tres modelos, sólo existen unas pequeñas diferencias. El modelo situado más hacia la izquierda presenta brazos y nervios más gruesos que el resto. El modelo situado en la parte central dispone de nervios y brazos más estrechos. Por último, el modelo de la derecha es igual al central exceptuando el soporte de

los motores, se ha reducido la fijación para que se sujete con dos tornillos en vez de los cuatro de los que dispone. El objetivo principal de estos tres diseños es reducir el peso de la estructura. Lógicamente, la resistencia del marco más grueso será mayor al central que a su vez será mayor que el de la derecha.

Marco delantero

La estructura cuenta con un marco adicional delantero que sirve para sujetar y proteger los componentes más importantes del dron y además, será la pieza dónde se anclan las alas. De este modo, la controladora, la placa distribuidora y la antena se encuentran situados entre el marco principal y el delantero. Está ideado para que se pueda fijar con tornillos de 2 mm de diámetros y separadores.

En esta ocasión se han diseñado dos modelos diferentes. Los podemos observar en la siguiente imagen:

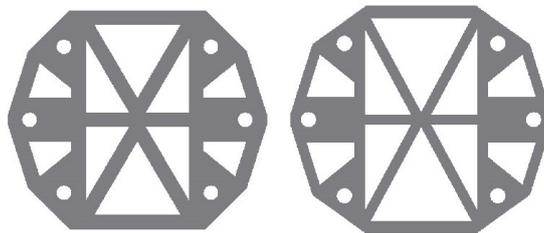


Figura 3.20: Diseños de los marcos frontales. (Fuente: Propia)

Comparando las Fig. (3.19) y (3.20) se puede apreciar que el diseño corresponde a la parte central de los marcos multirrotores. Se han diseñado basándose en la misma idea que los marcos principales. Por ello, sólo existe dos de modelos diferentes, el de la izquierda corresponde al marco principal más pesado y el de la derecha corresponde a los otros dos modelos.

Patatas

El otro componente que completa la estructura son las patas que harán la función de tren de aterrizaje y a su vez protegerán la batería que irá situada en la parte inferior del marco multirroto. Estas van situadas en los orificios rectangulares que se ven en los modelos de la Fig. (3.19).

Al igual que en el caso de los marcos frontales, se han realizado dos diseños diferentes:

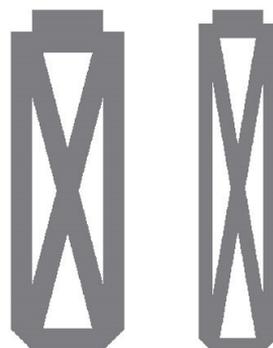


Figura 3.21: Diseños de las patas. (Fuente: Propia)

Existen principalmente dos diferencias: el grosor de los nervios y la anchura de la pata. La altura es la misma. El modelo de la izquierda corresponde al marco multirroto más pesado y la pata de la derecha corresponde a los otros dos.

Soporte de las alas

El soporte de las alas es una varilla de acero con forma similar a una C. Está soldado a dos tuercas que adecuan a los orificios externos del marco delantero. De este modo, la varilla irá colocado encima del marco delantero y las alas se colocarán en sus extremos y de manera perpendicular a los marcos. Este soporte permite ser desmontado con facilidad de este modo se pueden retirar las alas en caso de rotura o de querer volar sin ellas. Su forma en C permite evitar que el ala se rompa debido a los momentos aerodinámicos generados en las maniobras.

Dada la simplicidad del diseño del soporte, únicamente se ha realizado un diseño:



Figura 3.22: Diseño del soporte de las alas. (Fuente: Propia)

Como se puede observar se trata de un diseño muy sencillo. Esto se debe en gran medida a que se ha intentado reducir el peso lo máximo posible. Se ha elegido acero como material por su gran resistencia, sin embargo, su peso es mucho mayor lo cual supone un inconveniente.

Tiene las siguientes dimensiones:

$$L_{largo} = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

$$L_{corto} = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$$

$$Radio = 1 \text{ mm} = 1 * 10^{-3} \text{ m}$$

Teniendo en cuenta que su material es el acero, establecemos su peso aproximado:

$$V_{varilla} = \pi * R^2 (L_{largo} + L_{corto}) = 7,1 * 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$m_{varilla} = \rho_{acero} * V_{varilla} = 7850 * 7,1 * 10^{-7} = 5,55 \text{ g}$$

$$m_{soporte} = m_{varilla} + m_{tuercas} = 5,55 \text{ g} + 1 \text{ g} = 6,55 \text{ g}$$

Planos

Se incluyen los planos de todas las piezas de la estructura con sus respectivas cotas para poder repetir su fabricación. Únicamente se muestra la planta de las piezas dado que el grosor de todas es siempre de 3 mm.

elegir el modelo más adecuado se ha optado por realizar un análisis de tensión y observar el comportamiento de los diferentes modelos de marcos multirrotores. Teniendo en cuenta la robustez del diseño y su peso se establecerá el marco óptimo para el dron. Se ha realizado dicho análisis con el programa *Inventor*.

A continuación se describen los pasos seguidos para realizar los análisis de tensiones a partir de un modelo CAD en el programa de *Inventor*:

1. Realizamos extrusiones de 0,1 mm en los extremos de los brazos en el lugar dónde se sitúan los motores. De este modo, podremos definir un área dónde se aplicarán las fuerzas.
2. Entramos en la pestaña de *Entornos* y hacemos click en *Análisis de tensión*. Seleccionamos *Análisis estático* si se desea obtener un diagrama de Tensión de Von Mises y seleccionamos *Análisis Modal* si se desea obtener un diagrama de deformación.
3. Definimos un material para el marco en el apartado de *Asignar*. En este proyecto se ha seleccionado como material el plástico ABS por tener características similares a la madera que se pretende utilizar. Cabe destacar que este ensayo es puramente indicativo para comparar los diferentes modelos y que no se pretende obtener valores exactos de tensión o deformación.
4. En el apartado de *Restricciones* se pincha en el icono de *fijas* y se seleccionan los orificios dónde irán situados los tornillos que unirán el marco principal con el marco frontal.
5. Se pulsa en *Fuerzas*, se seleccionan las áreas extruidas, se define la dirección de la fuerza y se establece su magnitud. En este proyecto los motores pueden ejercer una fuerza máxima de 200 g y que equivale a 1,962 N.
6. Por último, se selecciona el icono *Simular* y se pulsa en *Ejecutar* para que la simulación comience. Una vez realizada los resultados se muestran automáticamente en pantalla.

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

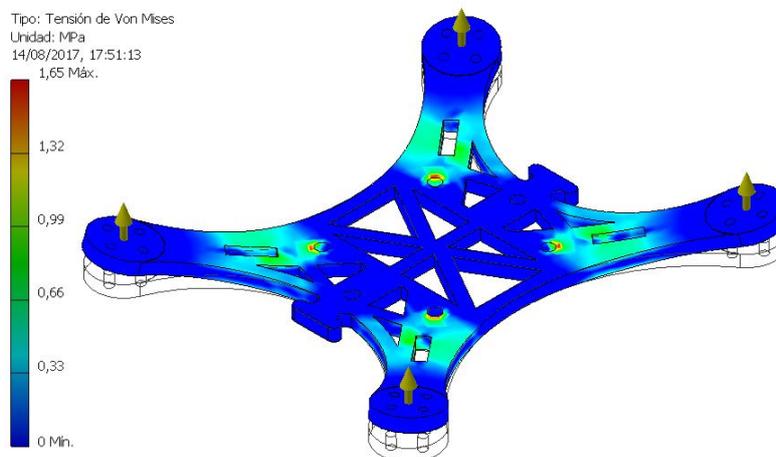


Figura 3.24: Distribución de la Tensión de Von Mises del modelo 1 de marco multirroto. (Fuente: Propia)

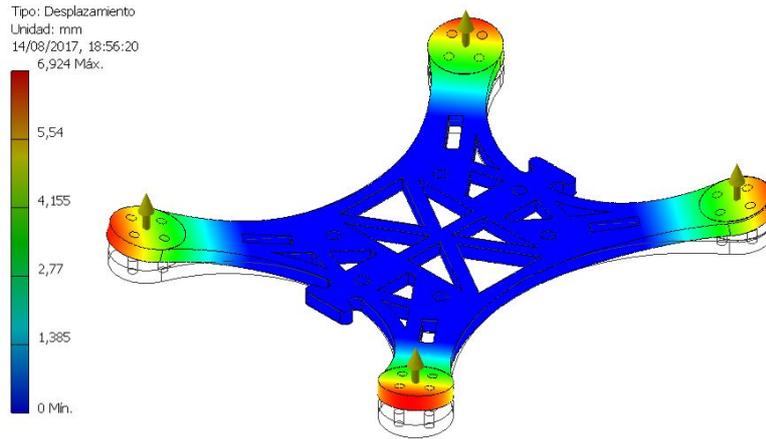


Figura 3.25: Deformación del modelo 1 de marco multirrotor. (Fuente: Propia)

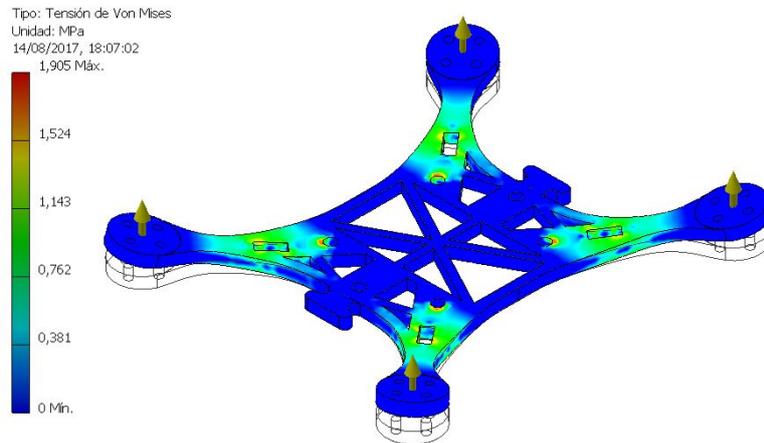


Figura 3.26: Distribución de la Tensión de Von Mises del modelo 2 de marco multirrotor. (Fuente: Propia)

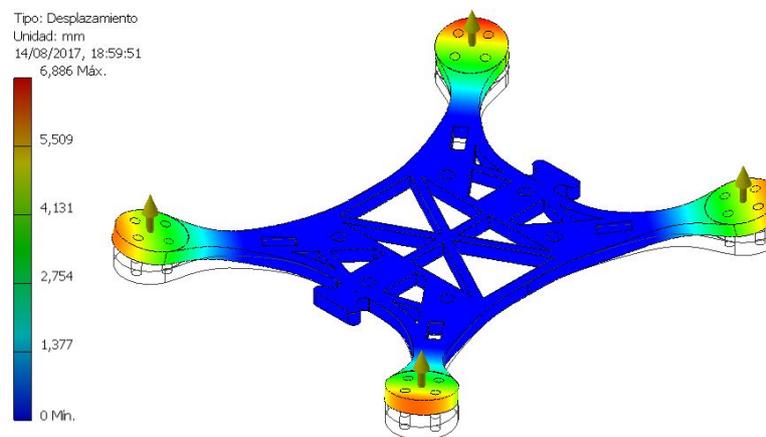


Figura 3.27: Deformación del modelo 2 de marco multirrotor. (Fuente: Propia)

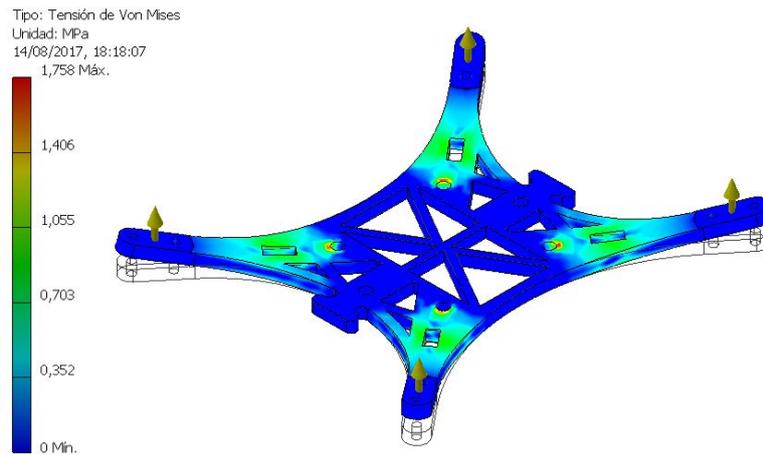


Figura 3.28: Distribución de la Tensión de Von Mises del modelo 3 de marco multirrotor. (Fuente: Propia)

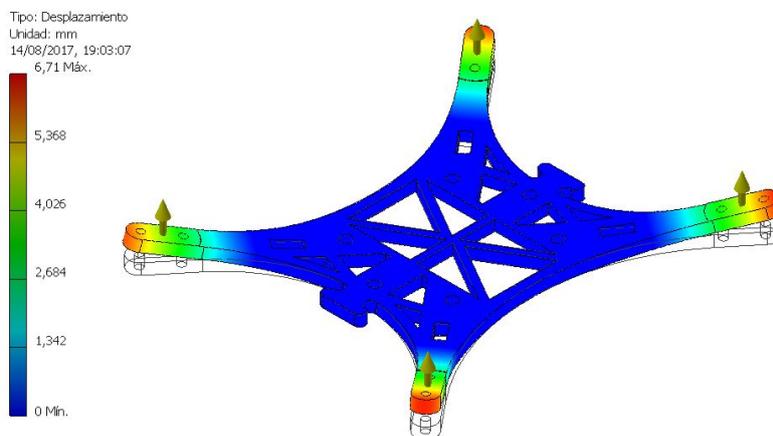


Figura 3.29: Deformación del modelo 3 de marco multirrotor. (Fuente: Propia)

Como se puede apreciar en las simulaciones de tensiones Fig. (3.24), (3.26) y (3.28), los mayores esfuerzos se concentran en los orificios de sujeción y alrededor de la ranura de las patas. Respecto a las deformaciones Fig. (3.25), (3.27) y (3.29), se hallan los mayores desplazamientos en los extremos de los brazos tal y como cabía esperar.

A continuación se muestran las máximas magnitudes de tensión y deformación juntamente con el peso de los marcos:

| Modelo | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------------|----------|----------|----------|
| <i>Máx. Tensión (MPa)</i> | 1.65 | 1.91 | 1.76 |
| <i>Máx. Desplazamiento (mm)</i> | 6.94 | 6.89 | 6.71 |
| <i>Peso (g)</i> | 11 | 9 | 8 |

Tabla 3.12: Datos de los diferentes modelos de marcos multirrotos.

Se deben analizar los resultados mostrados en la tabla (3.12). En primer lugar, cabe destacar que los pesos mostrados no son los reales ya que se ha designado como material el *Plástico ABS*. No obstante, la diferencia entre pesos sí será real ya que las piezas

presentan densidad homogénea. Además, la madera que se utilizará tiene una densidad similar por lo que los pesos no discreparán considerablemente del peso real.

Respecto a los valores de tensiones máximas y desplazamientos máximos de los diferentes modelos, se observa que son muy similares. Esto se debe a la semejanza entre los marcos analizados. Teniendo en cuenta la pequeña diferencia de pesos que supone escoger entre un modelo u otro, se ha seleccionado el modelo 1 para el marco multirrotor del dron dado que presenta la mejor distribución de tensiones.

Una vez elegido el diseño se debe establecer el peso de la estructura. Para ello, en primer lugar se mide la densidad de la madera que se utilizará:

$$\rho_{mad} = 400 \frac{kg}{m^3}$$

A continuación, se mide el área de las piezas haciendo uso del programa *Inventor*:

$$\begin{aligned} A_{marco_{principal}} &= 3,32 * 10^{-3} m^2 \\ A_{marcos_{delanteros}} &= 4 * 1,27 * 10^{-3} m^2 = 5,1 * 10^{-3} m^2 \\ A_{patas} &= 4 * 5,55 * 10^{-4} m^2 = 2,22 * 10^{-3} m^2 \\ A_{estruc} &= 1,06 * 10^{-2} m^2 \end{aligned}$$

Posteriormente se calcula el volumen:

$$V_{estruc} = 1,06 * 10^{-2} * 3 * 10^{-3} = 3,2 * 10^{-5} m^3$$

Finalmente, se obtiene el peso de la estructura:

$$m_{estruc} = V_{estruc} * \rho_{mad} = 3,2 * 10^{-5} * 400 = 0,012 kg = 12,8 g$$

3.5 Alas

En este apartado se procederá a diseñar las alas que se implementarán en el dron. Para facilitar su fabricación y diseño se ha optado por unas alas sin flecha y cuerda constante. Cabe destacar que añadirle flecha y variando la cuerda se podrían conseguir un mejor comportamiento aerodinámico.

Se tiene como objetivo conseguir unas alas funcionales y con un adecuado comportamiento. Para ello, se ha de realizar un análisis aerodinámico. Existen numerosas variables a tener cuenta, de momento, tenemos establecidas las siguientes:

$$\begin{aligned} T_{motor} &= 46 g = 0,45 N \\ T_{dron} &= 4 * T_{motor} = 1,81 N \end{aligned}$$

El empuje mostrado es el máximo que pueden suministrar los motores. Tener los motores al máximo durante un periodo prolongado de tiempo podría dañarlos, por ello se ha decidido que el dron vuele a un 80 % de la potencia límite:

$$T_{motor} = 4 * T_{motor} * 0,8 = 1,44 N$$

Dado que se trata de un complejo procedimiento y a modo de tener una visión generalizada, a continuación se enumeran los pasos que se seguirán:

1. Estimación del peso total del dron.
2. Elección de un ángulo de ataque de vuelo adecuado teniendo en cuenta las condiciones de vuelo.
3. Dimensionamiento de las alas basándose en la relación de aspecto de drones semejantes.
4. Estimar los coeficientes de sustentación y resistencia aerodinámica.
5. Establecer una velocidad de vuelo a partir del cálculo de equilibrio de fuerzas verticales y horizontales.
6. Calcular el coeficiente de sustentación necesario para que el dron vuele en las condiciones establecidas.
7. Selección del perfil alar adecuado.

3.5.1. Estimaciones iniciales

Este proyecto presenta gran incertidumbre en algunos de los parámetros de diseño, por ello se deben realizar ciertas estimaciones iniciales para poder operar y aplicar algunas de las ecuaciones. Al finalizar los cálculos, se debe comprobar que los valores de dichos parámetros no discrepen considerablemente. En caso contrario, se deberá realizar un proceso iterativo en el que se reajustan estos valores y las ecuaciones hasta que los resultados converjan.

Peso del dron

En primer lugar se retoman todos los pesos estimados hasta el momento:

$$m_{electrnica} = 93,5 \text{ g}$$

$$m_{soporte} = 6,55 \text{ g}$$

$$m_{estruc} = 12,8 \text{ g}$$

Por tanto, el peso del dron cuadricóptero sin las alas será de:

$$m_{dron \text{ sin alas}} = 93,6 + 6,55 + 12,8 = 112,85 \text{ g}$$

Dado que no se han fabricado las alas debemos realizar una estimación inicial sobre su peso. Se ha elegido como material de fabricación un poliestireno con la siguiente densidad:

$$\rho_{espuma} = 33,39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Además, dadas las dimensiones del dron, se ha establecido una cuerda de la siguiente longitud:

$$c = 8 \text{ cm} = 0,08 \text{ m}$$

Un parámetro importante en el diseño aerodinámico es la relación de aspecto (también conocido como *Aspect Ratio* en inglés). Para alas rectas y con cuerda constante:

$$AR = \frac{b}{c} \quad (3.1)$$

Teniendo en cuenta que los AR de los drones semejantes (tablas 3.1 y 3.2) se encuentran entre 2,81 y 4,6 se ha optado por elegir un valor intermedio. Además, cabe destacar que posteriormente se hará uso de la teoría clásica de *Prandtl*, la cuál sólo es apta para alas con una relación de aspecto $AR \geq 4$. Por estos motivos se ha elegido el siguiente valor:

$$AR_{dron} = 4$$

Con la cuerda y la relación de aspecto se ha definido la envergadura de las alas:

$$b_{dron} = AR * c = 32 \text{ cm} = 0,32 \text{ m}$$

Aunque la necesidad no es inmediata, es conveniente calcular la superficie alar:

$$S_w = b * c = 0,32 * 0,08 = 0,0256 \text{ m}^2$$

Por último, se escoge un posible perfil alar. Teniendo en cuenta sus características caso se ha elegido el perfil *NACA 0015*. Utilizando el programa *AutoCad* y teniendo en cuenta la cuerda y la envergadura, se ha obtenido el área transversal del ala:

$$A_{transversal} = 6,3 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Finalmente se calcula el peso de las alas:

$$m_{alas} = V_{alas} * \rho_{espuma} = A_{transversal} * b * \rho_{espuma} = 6,3 * 10^{-4} * 0,032 * 33,39 = 6,73 * 10^{-3} \text{ kg} = 6,73 \text{ g}$$

Una vez realizados los cálculos, podemos estimar el peso total del dron:

$$m_{dron} = m_{dron \text{ sin alas}} + m_{alas} = 112,85 + 6,73 = 119,58 \text{ g}$$

$$W_{dron} = 119,58 / 1000 * 9,81 = 1,173 \text{ N}$$

Ángulo de ataque

Más que una estimación inicial, el ángulo de ataque de vuelo es un parámetro de diseño. No obstante, se encuentra en este apartado debido a que se trata de un valor no definitivo. Tras realizar los cálculos requeridos se comprobará que sea el ángulo óptimo, en caso contrario, se modificará su valor en consecuencia.

Perfiles alares como el *NACA 0015* pierden sustentación a partir de los 10° de ángulo de ataque. Dado que se trata de un parámetro que podemos elegir a nuestra conveniencia, se ha elegido un ángulo de ataque que se encuentra en la mitad del abanico de valores posibles. De este modo, se tendrá mayor flexibilidad operativa y además se podrá modificar su valor en caso de haber cometido errores en los cálculos.

$$\alpha_{dron} = 5^\circ = 0,087 \text{ rad}$$

Velocidad de vuelo

La velocidad de vuelo es el parámetro más complejo a estimar ya que se deben tener en cuenta una gran cantidad de factores. Para poder obtener su valor, se deben establecer el equilibrio de fuerzas total del dron durante el vuelo.

Es común separar las fuerzas en verticales y horizontales dado que la naturaleza de las mismas es diferente y además se simplifican las operaciones. En las fuerzas verticales predominan el peso y las fuerzas de sustentación mientras que en las horizontales prevalecen las de resistencia aerodinámica y las fuerzas de empuje. No obstante, dado que el vehículo opera con cierto ángulo de ataque, algunas fuerzas supuestamente horizontales tendrán cierto efecto sobre las verticales y viceversa.

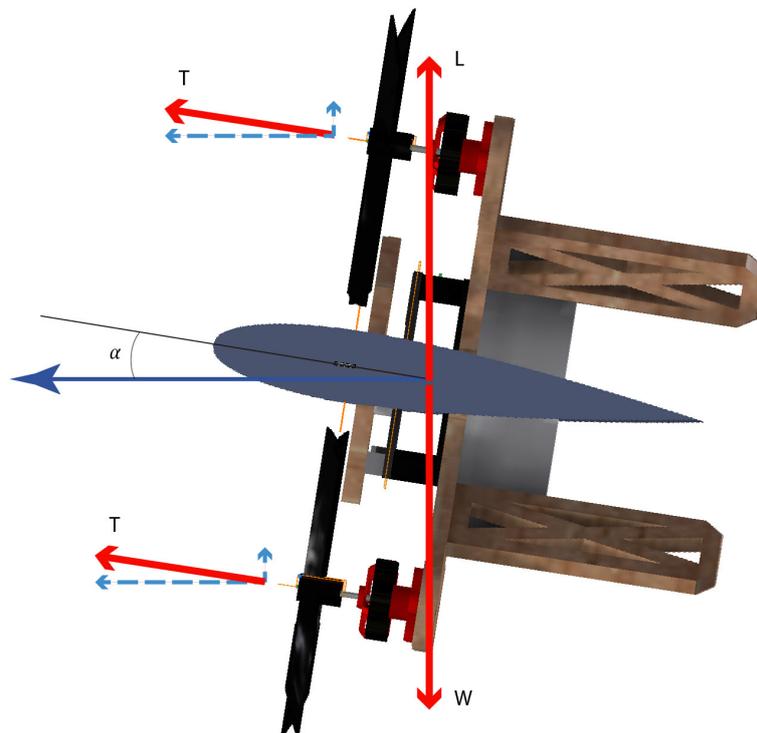


Figura 3.30: Distribución de fuerzas durante el vuelo del dron. (Fuente: Propia)

En primer lugar se establece el equilibrio de las fuerzas verticales. Las fuerzas que intervendrán son la fuerza de sustentación, el peso y la componente vertical de las fuerzas de empuje de los motores. Para el cálculo de la sustentación se toma como primera estimación que las alas son placas planas. El coeficiente de sustentación para placas planas es

$CL = 2\pi\alpha$, la demostración matemática se encuentra en [6, chapter 2.20]. La sustentación se calculará del siguiente modo:

$$L_{wing} = \frac{1}{2} \rho V^2 S_w CL = \pi \rho V^2 S_w \alpha = \pi * 1,255 * V^2 * 0,0256 * 0,087 = 8,88 * 10^{-3} V^2 N$$

$$L_{motores} = T_{dron} \sin(\alpha) = 0,126 N$$

$$L_{dron} = L_{wing} + L_{motores} = 0,126 + 8,88 * 10^{-3} V^2 N$$

Cabe destacar que se ha utilizado el valor de densidad atmosférica correspondiente al aire en condiciones normales y a altitud del mar. Este valor se ha obtenido de la atmósfera ISA (acrónimo de *International Standard Atmosphere*), se trata de un modelo atmosférico invariante creado por la OACI (acrónimo de *Organización de Aviación Civil Internacional*).

Para que el dron vuele en equilibrio y con las condiciones dadas, la sustentación deberá ser equivalente al peso. Estableciendo esta igualdad y despejando, podremos calcular el valor de la velocidad de vuelo:

$$L_{dron} = W_{dron}$$

$$0,126 + 8,88 * 10^{-3} V^2 = 1,173$$

$$V = 10,88 \frac{m}{s}$$

A continuación se debe repetir un proceso análogo pero para las fuerzas horizontales. En este caso, intervendrán la componente horizontal de las fuerzas de empuje y la resistencia aerodinámica (también conocida como drag). Dado que sabemos el empuje que tienen los motores, únicamente necesitamos hallar la resistencia aerodinámica del dron. Para hallar valores considerablemente precisos se requerirían procesos alternativos más costosos como hacer uso del túnel de viento, o realizar un análisis en un programa de *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*). Se han descartado ambas ideas ya que no se tiene acceso a un túnel con una sección suficientemente grande y por la dificultad que presenta modelar un dron con sus hélices en movimiento en *CFD*.

Para estimar el drag, es necesario obtener el coeficiente de resistencia. Para ello, se ha optado por utilizar aproximaciones. No se trata de un proceso exacto pero sí proporcionará un valor próximo. Se ha considerado que el dron tiene dos partes principales: las alas y el cuerpo. Se considerarán las alas como placas planas y el cuerpo como una placa cuadrada de 6 cm de lado. Aunque se podría utilizar únicamente la analogía de placa plana haciendo uso de un factor de forma muy elevado, se ha optado por utilizar los datos presentados en el estudio [5, pág. 2442] dado que se han validado experimentalmente:

$$CD_{alas} = 0,13$$

$$CD_{cuerpo} = 1,05$$

De este modo:

$$D_{dron} = \frac{1}{2} \rho V^2 S CD = \frac{1}{2} \rho V^2 (S_w CD_{alas} + S_{cuerpo} * CD_{cuerpo})$$

$$D_{dron} = \frac{1}{2} 1,255 V^2 (0,0256 * 0,13 + 0,0036 * 1,05) = 0,0045 V^2 N$$

Al igual que antes, para que el dron vuele a velocidad constante y en equilibrio debemos igualar la resistencia aerodinámica con la fuerza de empuje:

$$\begin{aligned} D_{dron} &= \cos \alpha * T_{dron} \\ 0,0045 V^2 &= \cos \alpha * 1,44 \\ V &= 17,93 \frac{m}{s} \end{aligned}$$

Esta velocidad que se ha calculado es con la cual se establece el equilibrio de fuerzas horizontales. No se podrá volar a mayor velocidad dado que a en ese caso la resistencia aerodinámica será mayor que la fuerza de empuje.

Una vez obtenida la velocidad de ambos equilibrios se debe establecer una velocidad de vuelo que sea inferior a la obtenida con la resistencia aerodinámica y superior a la obtenida con la sustentación. De este modo se conseguirá suficiente sustentación para hacer volar el dron y la resistencia aerodinámica será inferior al empuje. Se ha establecido la velocidad de vuelo a partir de la media aritmética de ambas velocidades:

$$V_{dron} = \frac{10,88 + 17,93}{2} = 14,4 \frac{m}{s}$$

Coefficiente de sustentación y número de Reynolds

Una vez establecidos los parámetros de vuelo del dron, el siguiente paso a seguir es calcular el coeficiente de sustentación (a partir de ahora CL). El CL es una de las características principales de los perfiles alares. Elegir un valor correcto es indispensable si se quiere que el vehículo vuele adecuadamente. Dado que hemos estimado el resto de valores necesarios, podemos calcular el CL requerido a partir de la ecuación de la sustentación e igualando al peso:

$$L_{dron} = \frac{1}{2} \rho V^2 S_w CL = W_{dron}$$

Sustituyendo los valores anteriormente obtenidos y despejando se obtiene que:

$$CL_{dron} = 0,35 \quad (3.2)$$

Por último, antes de proceder en la selección del perfil alar, es necesario saber el número de Reynolds durante el vuelo. El número de Reynolds es un número adimensional de gran importancia en el análisis del comportamiento de un fluido. Aporta información sobre si el régimen es laminar o turbulento. Se define como:

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

Dónde ν es la viscosidad cinemática, V la velocidad del fluido y L es una longitud característica. En aeronáutica para esta longitud suele tomarse la longitud de la cuerda. Sustituyendo los valores y calculando:

$$Re = \frac{V * L}{\nu} = \frac{14,4 * 0,08}{1,461 * 10^{-5}} = 78850$$

El valor de la viscosidad cinemática se ha obtenido a partir de la atmósfera ISA y para la altitud del mar tal y como se había hecho antes con la densidad del aire.

3.5.2. Selección del perfil alar

Una vez realizadas las estimaciones y cálculos pertinentes se puede proceder en la selección de un perfil alar adecuado para el dron. Cuando se analiza un perfil alar se debe analizar la curva polar que lo caracteriza. La curva polar es una gráfica dónde se muestra el CL en función del ángulo de ataque α o en función del CD. Cabe destacar que el CL mostrado en esta curva es el CL del perfil, es decir, se trata de un coeficiente de sustentación que considera la sección de una ala con envergadura infinita. Existen ciertos efectos tridimensionales que disminuyen este CL teórico. Para calcularlos se deberán hacer uso de la Teoría de Ala Larga de Prandtl también conocida como teoría clásica de Prandtl.

Para poder aplicar las ecuaciones de esta teoría hace falta definir el ala. Esto presenta un problema ya se necesitan las ecuaciones para elegir el perfil alar y no obstante, se necesita el ala para poder aplicar las ecuaciones. Una vez más, la solución reside en realizar estimaciones iniciales.

En este caso, se procederá del siguiente modo:

1. Se escogerá un perfil alar adecuado con un CL_{2D} superior al requerido.
2. Se hará uso de la teoría clásica de Prandtl para establecer el CL real del ala.
3. Se comparará con el CL requerido para el vuelo del dron.
4. En caso de una discrepancia considerable se modificarán las estimaciones o parámetros de vuelo necesarios y se repetirán los cálculos hasta que los resultados converjan.

1. Perfil alar inicial

Para la selección del perfil alar es necesario tener en cuenta el régimen de vuelo, en otras palabras, se debe prestar atención al número de Reynolds con el que volará el dron. El valor que se ha calculado anteriormente es de aproximadamente $Re = 80000$. Se trata de un valor considerablemente bajo, para realizar una mejor comparativa a continuación se muestran otros valores:

| Aeronave | Número de Reynolds |
|------------------------|--------------------|
| <i>Boeing 747</i> | 2 000 000 000 |
| <i>Avión comercial</i> | 110 000 000 |
| <i>Cessna</i> | 6 300 000 |
| <i>Avioneta</i> | 4 700 000 |
| <i>Planeador</i> | 1 600 000 |
| <i>Aeromodelismo</i> | 250 000 |
| <i>Avión de papel</i> | 47 000 |

Tabla 3.13: Números de Reynolds. (Fuente: www.laplace.us.es)

Como se aprecia, el dron volará con número de Reynolds muy inferior al de los aviones convencionales. Por tanto, es conveniente utilizar un perfil aerodinámico adecuado para estos regímenes. Tras un estudio de posibles perfiles alares se ha elegido el perfil

NACA 6409 encontrado en un catálogo de perfiles aerodinámicos para números de Reynolds bajos (Doc. [7, pág. 144]).

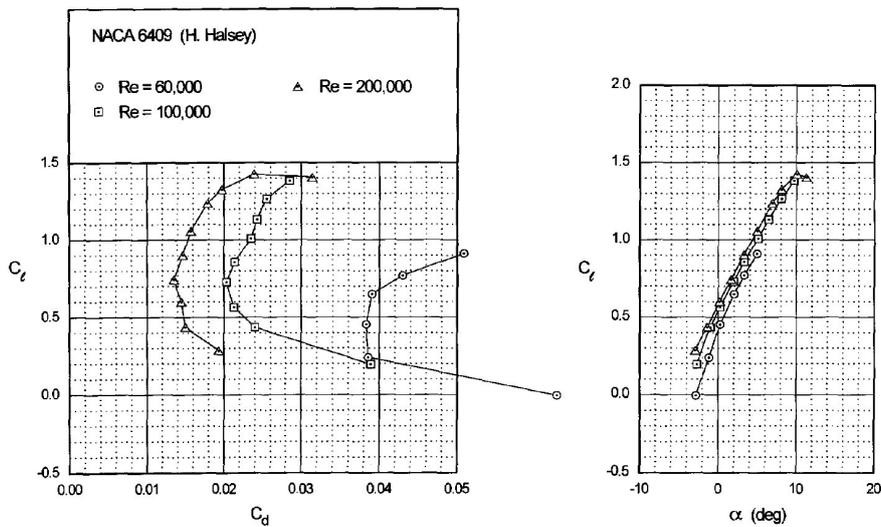


Figura 3.31: Curva polar del perfil NACA 6409. (Fuente: Summary of Low-Speed Airfoil Data doc. [7, pág. 145])

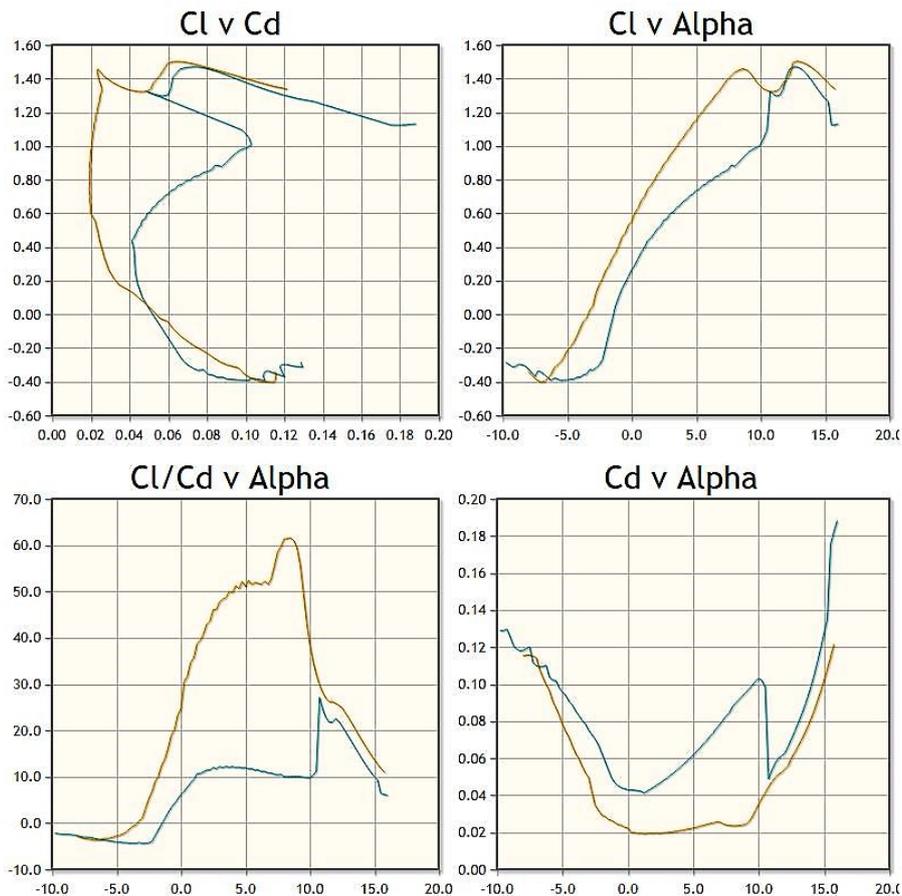


Figura 3.32: Gráficos del perfil NACA 6409 donde la curva naranja corresponde a un $Re = 100\,000$ y la azul a un $Re = 50\,000$. (Fuente: www.airfoiltools.com)

Observando las Fig. (3.32) y Fig. (3.14), se aprecia que la curva de Cl sufre una caída a partir de los 10° de ángulo de ataque. Esto se debe a que a partir de este ángulo, el

flujo empieza a desprenderse, por tanto, aparecen zonas del ala que dejan de producir sustentación. El ángulo de ataque elegido para el vuelo de este dron es de 5° , de modo que se tendrá cierta flexibilidad operativa. En caso de que los resultados teóricos no sean exactamente los reales, se tendrá un rango de valores en el que se podrá variar.

Aunque ambas fuentes son fiables, se obtendrán los datos a partir de la Fig. (3.32) por presentar mayor precisión y por ser una fuente más moderna. Para obtener los datos hay que tener en cuenta que el *Reynolds* de las curvas polares graficadas no corresponde al *Reynolds* de vuelo, por ello se ha elegido un valor medio:

| CL | Reynolds | Media |
|------|----------|-------|
| 1.15 | 100 000 | 0.95 |
| 0.74 | 50 000 | |

Tabla 3.14: Valor de CL del perfil aerodinámico. (Fuente: Propia)

Considerando el CL obtenido y el rango de ángulo de ataque posible antes del desprendimiento, se concluye a priori que se trata de un perfil alar adecuado para la aeronave.

Los datos geométricos de las alas se recogen en la siguiente tabla:

| Parámetro | Valor |
|---|-----------------------|
| <i>Perfil Alar</i> | <i>Naca 6409</i> |
| <i>Cuerda (c)</i> | 0.08 m |
| <i>Envergadura (b)</i> | 0.32 m |
| <i>Superficie alar (S_w)</i> | 0.0256 m ² |
| <i>Relación de aspecto (AR)</i> | 4 |

Tabla 3.15: Características iniciales de las alas.

Una vez establecida todos los parámetros geométricos de las alas se debe proceder aplicando la teoría clásica de Prandtl y de este modo hallar la sustentación real que genera el ala teniendo en cuenta los efectos tridimensionales.

2. Teoría de Ala Larga de Prandtl

Durante el vuelo de un avión, la diferencia de presiones entre el extradós y el intradós de las alas, genera unos torbellinos en punta de ala tal y cómo se aprecia en la Fig. (3.33).

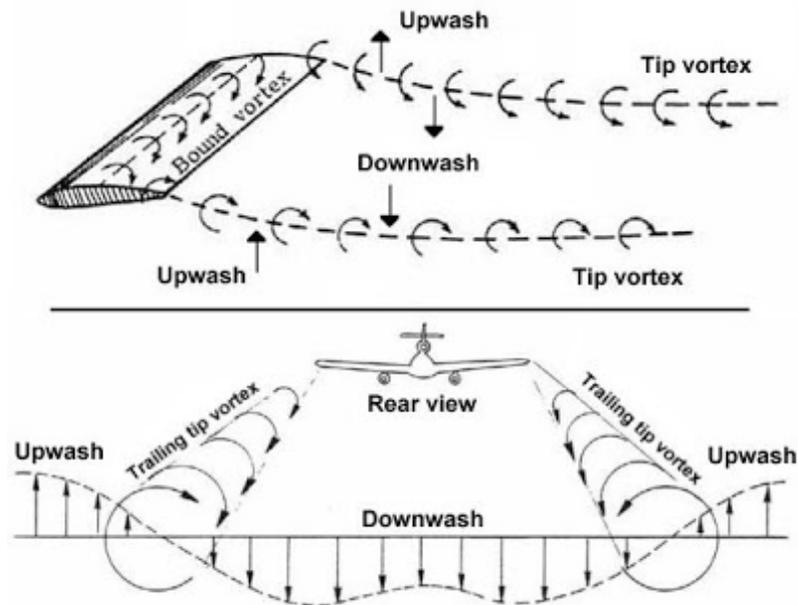


Figura 3.33: Distribución de los vórtices en punta de ala y efecto *downwash*. (Fuente: www.aeroscrapp.blogspot.com)

Estos torbellinos provocan una desviación de la corriente de aire hacia abajo. Como consecuencia el ángulo de ataque incidente es inferior al ángulo de ataque de vuelo y por tanto, la sustentación se ve reducida. Este efecto es conocido como *downwash* y se puede apreciar en la Fig. (3.34).

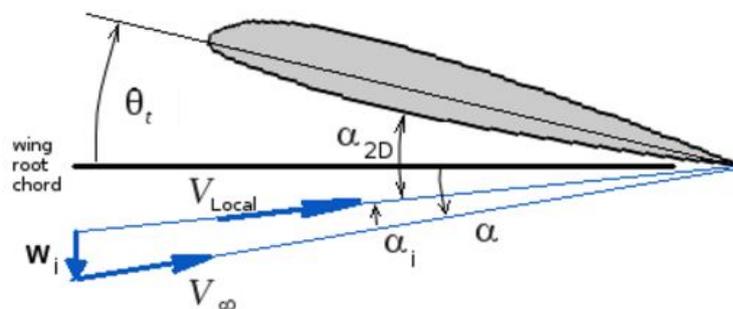


Figura 3.34: Esquema de la reducción del ángulo de ataque debido al efecto del *downwash*. (Fuente: [9])

Observando la Fig. (3.34) se deduce que:

$$\alpha_{eff} = \alpha - \alpha_i + \theta_t \quad (3.3)$$

$$\alpha_i = \arctan \frac{w_i}{V_\infty} \approx \frac{w_i}{V_\infty} \quad (3.4)$$

Dónde α es el ángulo de ataque real del ala, θ_t es el ángulo de torsión geométrica del ala (que en este caso no hay) y w_i es la velocidad inducida por los torbellinos.

La teoría clásica de Prandtl trata de modelizar un ala como un filamento de torbellinos a lo largo de su envergadura que a su vez genera la circulación en torno a esta. Para ello,

hace uso de la teoría potencial linealizada. Para un ala sin flecha y de gran alargamiento la línea de torbellinos se sitúa a $1/4$ de la cuerda y se define un sistema de coordenadas polares con origen el centro de la ala que recorra las alas a lo largo de su envergadura.

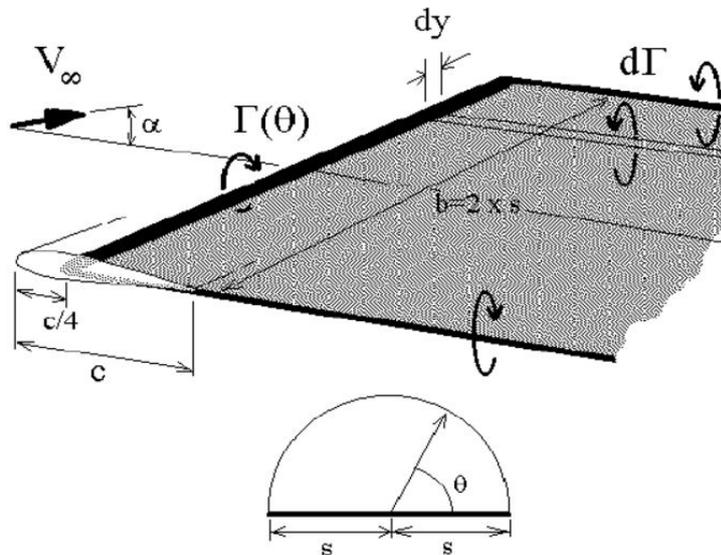


Figura 3.35: Modelización del ala mediante la teoría de Prandtl. (Fuente: [9])

Dónde Γ es la intensidad de la circulación, V_∞ es la velocidad del flujo libre, b la envergadura alar, s la semienvergadura, y es la distancia entre la raíz (el centro del ala) hasta un punto en la envergadura, c la cuerda y θ es la coordenada polar que se ha establecido.

$$y = s \cos \theta \quad (3.5)$$

Por otro lado, además de la línea sustentadora, existen los vórtices libres de borde fuga. Según el teorema de *Helmholtz*, estos vórtices son una estela de torbellinos que se desplazan aguas abajo hasta el infinito y son conocidos como vórtices de herradura. Para poder calcular sus efectos sobre la sustentación debe discretizarse el ala en un número infinito de vórtices de herradura que varían su intensidad dependiendo de su posición. Se supone una distribución elíptica de la intensidad de circulación.

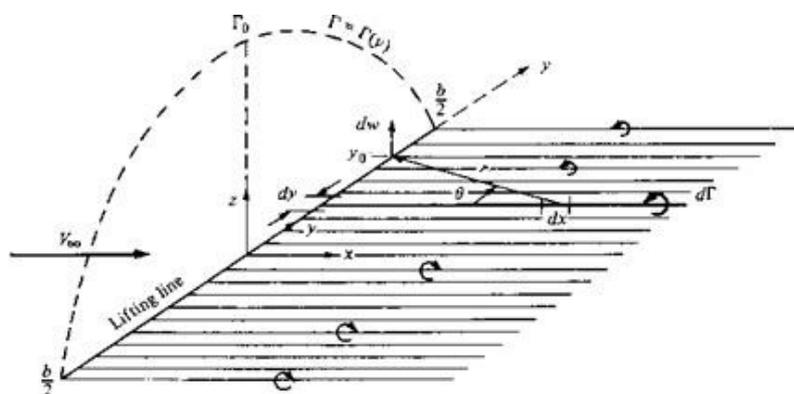


Figura 3.36: Modelización del ala mediante la teoría de Helmholtz. (Fuente: www.heli-air.net

)

Tomando diferenciales se establece la velocidad inducida generada por el *downwash*:

$$w(y_0) = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{\frac{d\Gamma}{dy} dy}{4\pi(y - y_0)} \quad (3.6)$$

A continuación debe establecerse la influencia del ángulo de ataque sobre el *downwash*. Para ello, en primer lugar se considera el ala como una placa plana:

$$c_L(y_0) = 2\pi(\alpha_{eff}(y_0) - \alpha_{L=0}(y_0)) \quad (3.7)$$

Cabe mencionar que este coeficiente está en minúscula ya que es el coeficiente de sustentación por unidad de envergadura. Su expresión en términos de circulación es la siguiente:

$$c_L = \frac{L'}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S_w} = \frac{\rho V_\infty \Gamma(y_0)}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 c(y_0)} = \frac{2\Gamma(y_0)}{V_\infty c(y_0)} \quad (3.8)$$

Combinando las Ecs. (3.7) y (3.8) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\Gamma(y_0)}{V_\infty c(y_0)} = \pi(\alpha_{eff}(y_0) - \alpha_{L=0}(y_0)) \quad (3.9)$$

$$\frac{\Gamma(y_0)}{\pi V_\infty c(y_0)} = \alpha(y_0) - \alpha_i(y_0) - \alpha_{L=0}(y_0) \quad (3.10)$$

A continuación se combinan las Ec. (3.4), (3.10) y (3.6):

$$\frac{\Gamma(y_0)}{\pi V_\infty c(y_0)} = \alpha(y_0) - \alpha_{L=0}(y_0) + \frac{1}{V_{infly}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{\frac{d\Gamma}{dy} dy}{4\pi(y - y_0)} \quad (3.11)$$

Dado que se ha asumido una distribución de la sustentación elíptica a lo largo de la envergadura del ala, la intensidad de la circulación se puede aproximar a una serie de Fourier:

$$\Gamma(\theta) = 2bV_\infty \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\theta) \quad (3.12)$$

Tomando diferenciales:

$$d\Gamma(\theta) = 2bV_\infty \sum_{n=1}^{\infty} n A_n \cos(n\theta) d\theta \quad (3.13)$$

Retomando la Ec. (3.11), aplicando el diferencial de la Ec. (3.13) y realizando el cambio de variable de la Ec. (3.5) se establece la siguiente ecuación:

$$\alpha(\theta_0) = \frac{4b}{C_{L\alpha} c(\theta_0)} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\theta_0) + \alpha_{L=0} + \sum_{n=1}^{\infty} n A_n \cos(n\theta) d\theta \quad (3.14)$$

Esta es la ecuación final que se utilizará para obtener los coeficientes A_1, A_2, A_3, \dots . Teniendo en cuenta que cada coeficiente es cada vez más pequeño se puede truncar la

serie a partir de un término A_N . Cuántos más términos se decida utilizar más precisa serán los resultados. Además, para alas simétricas los términos pares $A_2, A_4, A_6...$ son nulos, de modo que se pueden despreciar. Cada ecuación que se establezca a partir de la Ec. (3.14) corresponde a una sección del ala, es decir a un θ_0 , por tanto para obtener el valor de los coeficientes se debe establecer un sistema de ecuaciones.

Una vez hallado los coeficientes se pueden hallar los coeficientes de sustentación y de resistencia aerodinámica. Para ello, en primer lugar establecemos la ecuación que define el coeficiente de sustentación:

$$C_L = \frac{1}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S_w} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} L'(\theta) dy \quad (3.15)$$

Además:

$$L'(\theta) = \rho V_\infty \Gamma(\theta) \quad (3.16)$$

Combinando las Ec. (3.12), (3.15) y (3.16) se obtiene la siguiente expresión que define el coeficiente de sustentación:

$$C_L = \frac{2}{V_\infty S_w} \int_0^\pi \Gamma(\theta) \frac{b}{2} \sin \theta d\theta = \frac{2b^2}{S_w} \sum_{n=1}^N A_n \int_0^\pi \sin(n\theta) \sin \theta d\theta = A_1 \pi \frac{b^2}{S_w} = A_1 \pi AR \quad (3.17)$$

Por tanto, para poder establecer el sistema de ecuaciones que permita obtener el valor del coeficiente de sustentación real, en primer lugar se deben establecer los valores de los parámetros requeridos para los cálculos:

| Parámetro | Valor |
|---|--------------------|
| Velocidad | 14.4 $\frac{m}{s}$ |
| Ángulo de ataque (α) | 5 ° |
| Envergadura (b) | 0.32 m |
| Cuerda (c) | 0.08 m |
| Relación de aspecto (AR) | 4 |
| Torsión geométrica (θ_t) | 0 ° |
| Ángulo de sustentación nula ($\alpha_{L=0}$) | -2.5 ° |
| Pendiente de la sustentación (C_{L_α}) | 6.5 |

Tabla 3.16: Valores de los parámetros necesarios para aplicar la teoría de Ala Larga de Prandtl.

El valor de C_{L_α} se ha obtenido gráficamente a partir de las curvas polares de la Fig. (3.32).

Se ha procedido realizando un programa en el software *Matlab* que realice los cálculos. De este modo, en caso de ser necesario, se podría repetir cambiando los parámetros necesarios. Ejecutando el programa se obtiene que:

$$C_{L_{real}} = 0,54 \quad (3.18)$$

Se puede apreciar que se trata de un CL considerablemente mayor al requerido por el dron Ec. (3.2): $CL = 0,35$. Por tanto, se deben realizar cambios y repetir los cálculos hasta que los resultados sean semejantes.

Se deben realizar modificaciones para disminuir la sustentación generada. Dado que los valores elegidos anteriormente son coherentes se ha decidido reducir ligeramente la superficie alar, el empuje de los motores y el ángulo de ataque hasta conseguir converger los resultados. Modificando las variables y repitiendo todos los cálculos presentados en esta sección se establecen los siguientes parámetros de vuelo:

| Parámetro | Valor |
|----------------------------------|---------------------|
| Perfil NACA | 6409 |
| Velocidad | 17.01 $\frac{m}{s}$ |
| Reynolds | 69864 |
| Palanca de empuje de los motores | 70 % |
| Ángulo de ataque (α) | 4 ° |
| Aspect Ratio (AR) | 4 m |
| Cuerda (c) | 0.06 m |
| Envergadura (b) | 0.24 m |
| CL requerido | 0.47 m |
| CL real del ala | 0.47 m |

Tabla 3.17: Parámetros de vuelo del dron.

Cabe mencionar que en caso de haber realizado mal las estimaciones, existe cierta flexibilidad operativa, se puede aumentar o reducir el ángulo de ataque y el empuje de los motores para conseguir equilibrar el vuelo del dron.

3.6 Modelado

Una vez definidos todos los componentes del dron se puede proceder en el modelado. A continuación se presenta un modelo de CAD de la estructura realizado con el programa de *Inventor*:

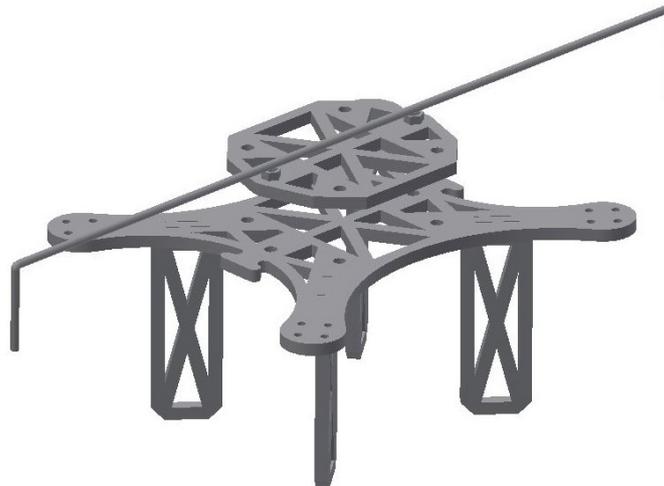


Figura 3.37: Modelado CAD de la estructura del dron. (Fuente: Propia)

En la Fig. (3.37) se puede apreciar que las patas van simplemente insertadas en los orificios del marco multirrotores. En un primer momento, se pensó en utilizar un adhesivo para unir ambas piezas. No obstante, finalmente se ha optado por la utilización de bridas. De este modo, se pueden quitar y reponer las patas con facilidad en caso de rotura.

A continuación se muestran las tres vistas de la estructura del dron sin el soporte para tener una mejor visión sobre su diseño:

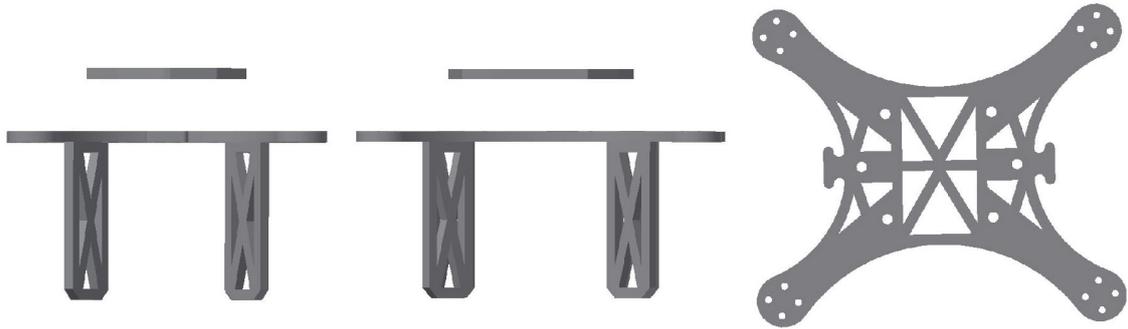


Figura 3.38: Planta, alzado y perfil (derecha a izquierda) del modelo CAD de la estructura del dron. (Fuente: Propia)

Tras tener el diseño de todos los elementos estructurales, se han añadido los componentes electrónicos y se han texturizado las superficies para dotar el modelo de más realismo.

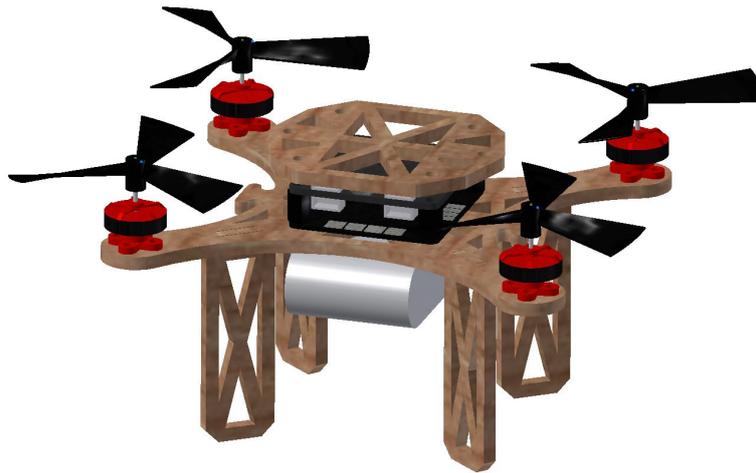


Figura 3.39: Modelado CAD del dron sin las alas. (Fuente: Propia)

También se muestran las tres vistas del dron cuadricóptero sin las alas:



Figura 3.40: Planta, alzado y perfil (derecha a izquierda) del modelo CAD del dron cuadricóptero sin las alas. (Fuente: Propia)

Por último, para completar el diseño se le añadirán las alas y el soporte:

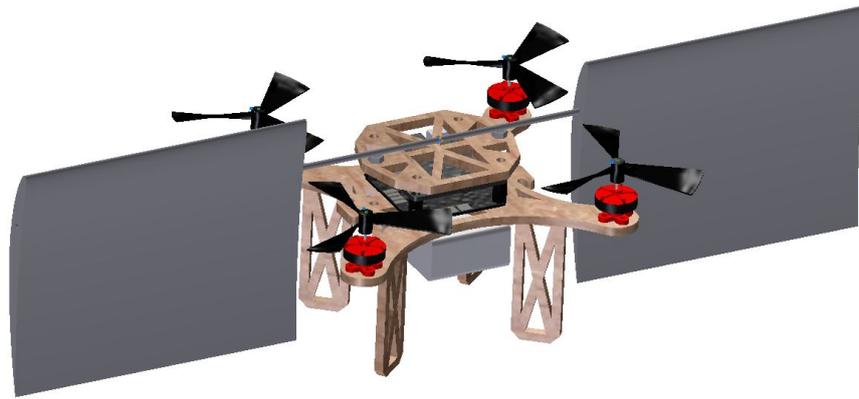


Figura 3.41: Modelado CAD del dron con las alas. (Fuente: Propia)

Al igual que antes se incluyen las tres vistas del modelo:

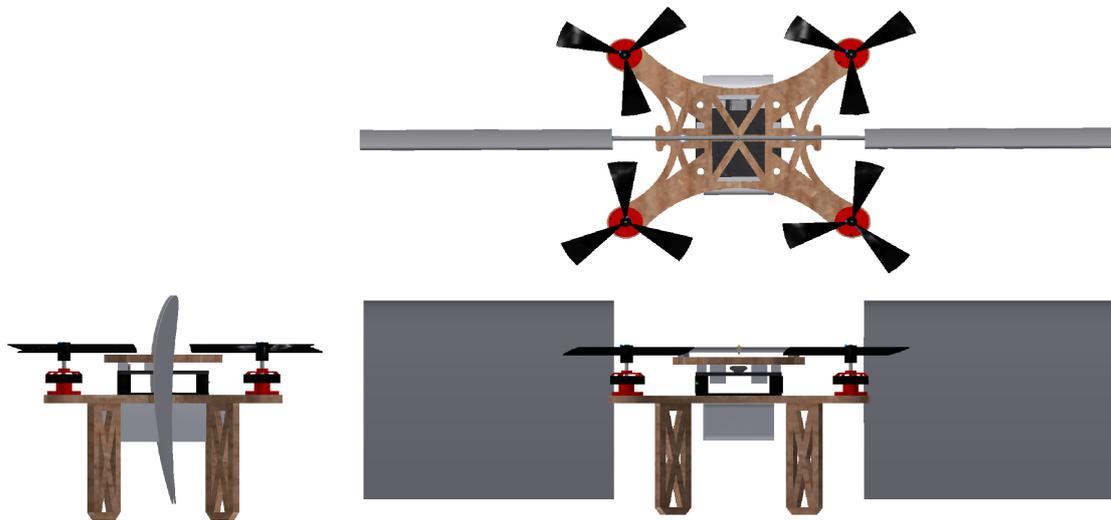


Figura 3.42: Planta, alzado y perfil del modelo CAD del dron cuadricóptero con las alas. (Fuente: Propia)

CAPÍTULO 4

Fabricación

Una vez se ha realizado el diseño definitivo y completo del dron podemos llevarlo a la realidad. En este capítulo se encuentra explicado su proceso de fabricación, ensamblaje y montaje. El proceso se ha descrito conforme el orden real seguido.

4.1 Material

Para poder elaborar el dron se requiere una gran cantidad de material, componentes y herramientas. Es recomendable conseguir todo el material antes de proceder en el proceso de fabricación. Para una mayor comodidad a continuación se muestran varias tablas con todo el material que se requiere.

| Componentes electrónicos | Modelo | Cantidad |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| <i>Controladora de vuelo</i> | F3 Acro 6 DOF | 1 |
| <i>Placa distribuidora</i> | Lantian BEC Output 5V 12V 3A | 1 |
| <i>Motor</i> | Racerstar BR1103 8000KV | 4 |
| <i>ESC</i> | Racerstar RS6A V2 6A 1-2S | 4 |
| <i>Hélices</i> | Racerstar 2030 R-BN55x3 Bullnose | 4 |
| <i>Batería</i> | ZOP Power 7.4V 850mAh 25C | 1 |
| <i>Receptor</i> | FR Sky XM | 1 |
| <i>Transmisor</i> | FR Sky X9D | 1 |

Tabla 4.1: Componentes electrónicos del dron.

Herramientas

Llave allen de 2 mm
Destornillador de estrella de 2 mm
Soldador de estaño
Pinzas metálicas
Cúter o tijeras de precisión

Tabla 4.2: Herramientas requeridas para la fabricación del dron.

| Material estructural | Características | Cantidad |
|------------------------------|-------------------------------------|------------|
| <i>Cableado</i> | 1 mm de diámetro | 1 m |
| <i>Madera</i> | contrachapado de 3 mm de grosor | 40 x 40 cm |
| <i>Bridas</i> | 2 mm de anchura | 4 |
| <i>Gomas elásticas</i> | tamaño reducido | 2 |
| <i>Separadores de nylon</i> | 5 mm de altura y 3 mm de diámetro | 4 |
| <i>Tornillos de nylon</i> | 1 cm de longitud y 3 mm de diámetro | 8 |
| <i>Tornillos de acero</i> | 6 mm de longitud y 3 mm de diámetro | 2 |
| <i>Tuercas de acero</i> | 3 mm de diámetro | 2 |
| <i>Cinta adhesiva</i> | fina y de doble cara | 1 m |
| <i>Material bicomponente</i> | soldadura en frío | 1 |
| <i>Estaño</i> | alma de resina | 10 ml |

Tabla 4.3: Componentes estructurales del dron.

Cabe tener en cuenta las siguientes consideraciones sobre las tablas:

- No se ha incluido la máquina de corte por láser y la máquina de corte por hilo dado que se trata de maquinaria, no obstante, se necesita el acceso a ellas.
- Se ha indicado la cantidad necesaria para poder fabricar un único dron. Es conveniente disponer de recambios de tornillos, gomas elásticas, batería etc.
- El material que se muestra en las tablas es el que se ha utilizado para fabricar este dron. Se pueden utilizar materiales alternativos en caso de necesidad o conveniencia.
- Dado que se trata de una larga lista de materiales no es necesario disponer de antemano todos los componentes mencionados para empezar el proceso de fabricación. Aunque no es recomendable se pueden ir adquiriendo según se vayan necesitando.

4.2 Estructura

La estructura se ha diseñado para ser cortada a partir de una lámina de madera de contrachapado de 3 mm. Una posibilidad sería utilizar una fresadora para cortar las piezas, no obstante, su reducido tamaño y los pequeños orificios que contiene lo impide. Se necesita una herramienta mucho más precisa. Por ello, se ha utilizado una máquina de corte por láser.

Para poder hacer uso de esta máquina se necesita un archivo *.dxf* del plano que se pretende cortar. Se ha optado por recortar varias piezas de los marcos y patas de los diferente modelos para tener recambios en caso de rotura o en caso de querer utilizar otro de los modelos. El plano utilizado se muestra a continuación:

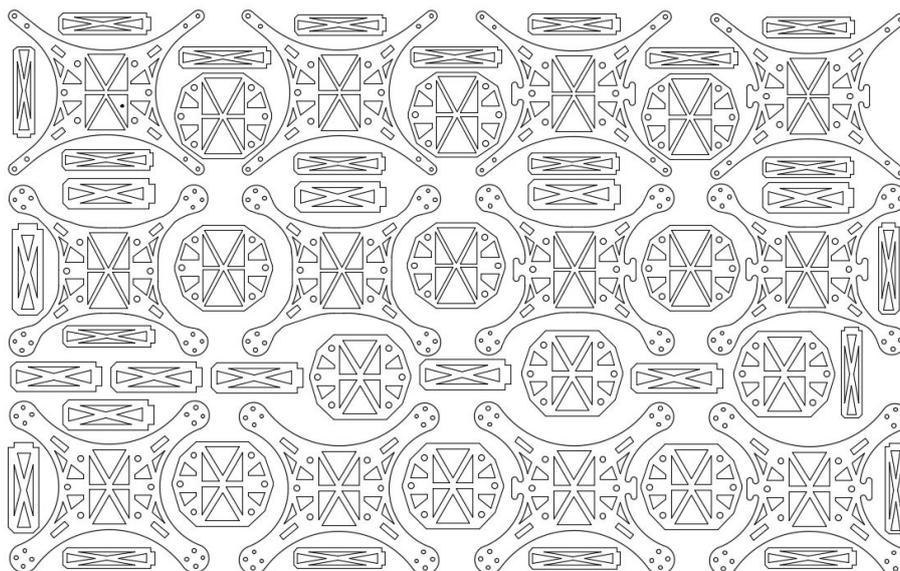


Figura 4.1: Plano de corte de la estructura del dron. (Fuente: Propia)

Como se puede apreciar, se han cortado piezas para poder montar cualquiera de los modelos diseñados en caso de necesidad. Además, se han cortado repetidas veces cada pieza para poder tener recambios. Se ha optimizado el espacio de modo que se desperdicie la menor cantidad de madera posible.



Figura 4.2: Máquina láser realizando el corte de la estructura del dron. (Fuente: Propia)

4.3 Componentes electrónicos

Antes de ensamblar la piezas de la estructura deben soldarse los componentes eléctricos. El modo correcto de proceder es situar los componentes eléctricos sobre el marco multirroto y una vez colocados y fijados se empieza a soldar. De este modo se consigue que los cables tengan la longitud deseada y se evitan posibles problemas.

Dicho esto, el primer componente que debe colocarse son los motores. Para ello, se sitúan los motores sin las hélices en los extremos de las patas y atornillamos haciendo uso de un destornillador de estrella pequeño (los tornillos vienen con los motores).

A continuación se colocan los ESCs en los brazos justo por encima de los orificios donde van las patas. Es conveniente utilizar un poco de cinta de doble cara o algún adhesivo superficial para fijar los ESCs de manera provisional, de este modo se podrá soldar más fácilmente. Una vez colocados se cortan y se pelan los tres cables de cada motor y se suelda a cada uno de los bornes de los ESCs. No se deben cruzar los cables y es recomendable utilizar estaño con alma de resina.



Figura 4.3: Soldadura de los ESCs. (Fuente: Propia)

El siguiente componente que se debe soldar es la PDB. Para ello, se coloca en el lugar central del marco multirroto y se atornilla junto a unos separadores. Posteriormente se sueldan los cables de alimentación de los ESCs tal y como se muestra en la Fig. (4.4).

El siguiente paso a dar es conectar los componentes a la FC. Se trata de la pieza más complicada dado que tiene una gran cantidad de conexiones y poco espacio. Dicho esto, se debe prestar especial atención en utilizar la menor cantidad posible de cableado pero la suficiente para poder separar la FC de la PDB a una distancia suficiente que permita al usuario modificar o reparar las conexiones de ambas placas. En primer lugar, se sueldan los cables de alimentación de la FC desde la salida de 5 V de la PDB a la entrada 8. A continuación deben conectarse los cables de señal de los ESCs a la FC, son los cables centrales blanco (cable azul en la imagen) y negro. Se deben soldar en las entradas correspondientes tal y como se muestra en los números que aparecen en la Fig. (4.4). Esta configuración debe respetarse dado que es la que utiliza el *software* de control que se empleará más adelante.

Respecto a la batería, se deben soldar sus cables de alimentación a los bornes positivo y negativo del lado superior de la PDB. En caso de disponer de más de una batería, se puede soldar un conector que permita cambiar de batería fácilmente. La batería irá situada en la parte inferior del dron e estará sujeta por gomas elásticas que se enganchan las pestañas laterales del marco multirroto.

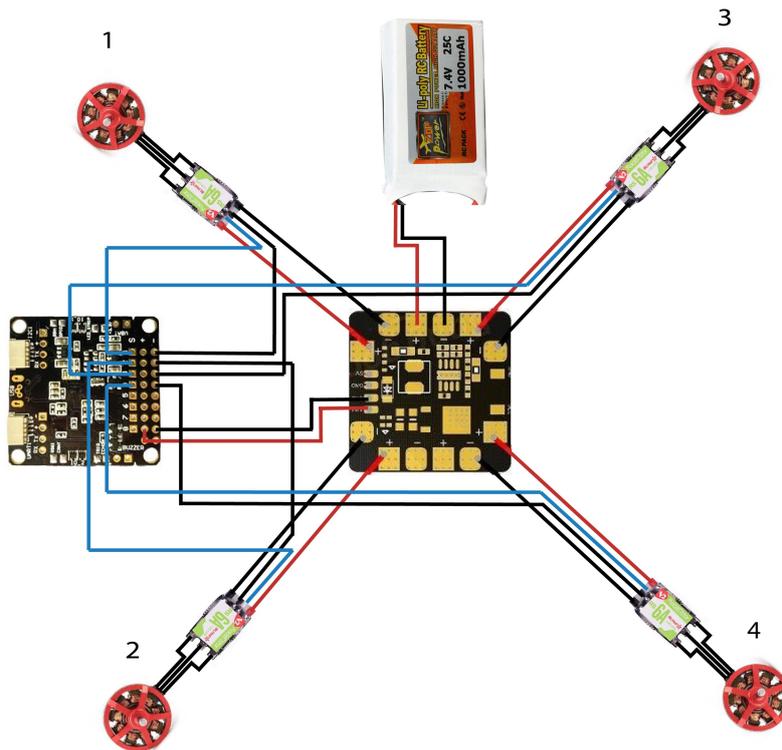


Figura 4.4: Esquema del circuito eléctrico. (Fuente: Propia)

Cabe destacar que se ha utilizado cableado azul en la Fig. (4.4) para sustituir el blanco. No debe causar confusión. Otro dato a tener en cuenta es que en la imagen se muestra la parte posterior de la FC, en su parte frontal hay una flecha dibujada que indica el sentido frontal del dron, esta flecha debe ir señalando hacia el lado opuesto que el de las conexiones de la batería en la PDB.

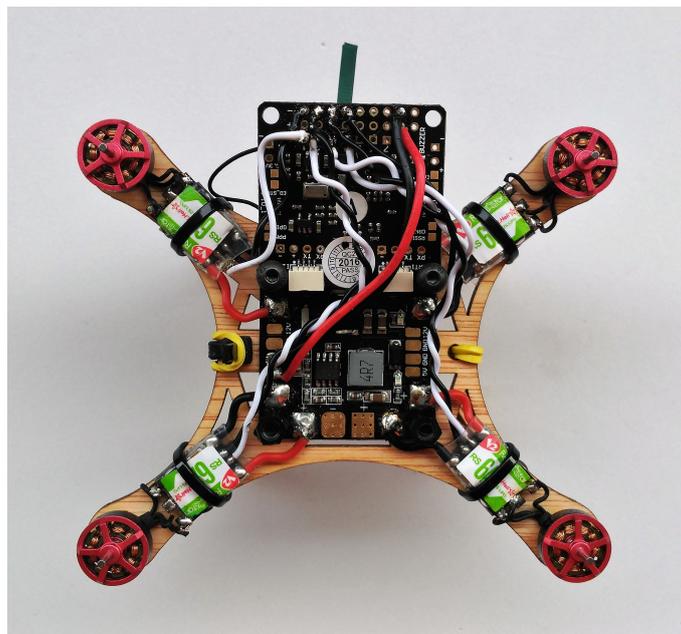


Figura 4.5: Cableado del dron. (Fuente: Propia)

Por último se debe soldar el receptor. Para ello, en primer lugar atornillamos la FC a los separadores para fijarla. El receptor tiene tres bornes en un lado y en el opuesto está

la antena. Fijamos el receptor con ayuda de una cinta de doble cara a la FC y la soldamos tal y como se muestra en la Fig. (4.6).

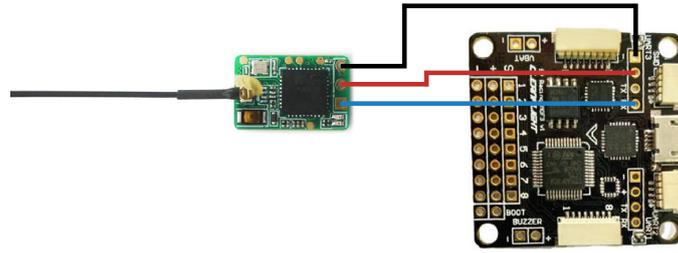


Figura 4.6: Esquema eléctrico de la antena. (Fuente: Propia)

En la Fig. (4.6) no se muestra el receptor en su posición real, este debería estar situado justo encima de la FC y por debajo del marco delantero. En la Fig. (4.7) se puede apreciar las conexiones realizadas y su posición en el dron.

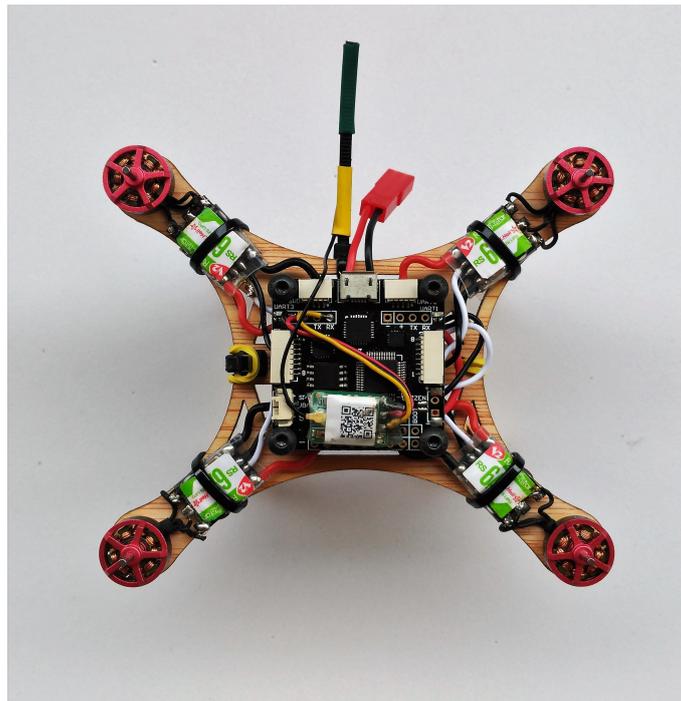


Figura 4.7: Conexiones de la antena. (Fuente: Propia)

Una vez soldados todos los componentes electrónicos se procede en el ensamblaje del resto de piezas estructurales. En primer lugar se atornilla el marco delantero justo por encima de la FC. Posteriormente, se colocan las patas en el orificio rectangular que hay en los brazos y los unimos con una brida. La brida puede rodear también los ESCs y de este modo conseguir fijarlos también. No se ha utilizado pegamento para las patas porque de este modo, el dron es más fácil de desmontar.

Por último, se colocan las hélices en los motores. Una vez puestas, el dron está listo para volar como un dron cuadricóptero convencional. A continuación se muestran imágenes sobre el dro cuadricóptero sin las alas:



Figura 4.8: Planta del dron cuadricóptero sin las alas. (Fuente: Propia)



Figura 4.9: Perfil del dron cuadricóptero sin las alas. (Fuente: Propia)



Figura 4.10: Brazo del dro cuadricóptero sin alas. (Fuente: Propia)



Figura 4.11: Vista posterior de la planta del dron. (Fuente: Propia)

Las fotos mostradas corresponden al dron utilizando un marco multirroto provisorio que carecía de pestañas laterales. Por ello, se ideó una sujeción para la batería. En el modelo definitivo la goma se engancha a las pestañas y de este modo sujeta la batería.

4.4 Alas

Para el soporte de las alas, se ha utilizado una varilla de acero de 2 mm de diámetro. Posteriormente y con ayuda de unas alicates se han doblado los extremos para mejorar la sujeción. A continuación, se ha utilizado el material bicomponente mostrado en la Fig. (4.12) para realizar una soldadura en frío la varilla y dos tuercas de 3 mm de diámetro. Se ha aplicado el material repetidas veces hasta conseguir un resultado deseado.



Figura 4.12: Material bicomponente para soldadura en frío. (Fuente: www.araldite.com)

Respecto a las alas, se han fabricado haciendo uso de una espuma de alta densidad y de una máquina de corte por hilo como la de la siguiente imagen:



Figura 4.13: Máquina de corte por hilo. (Fuente: Propia)

La estructura que sujeta el hilo se puede desplazar a lo largo del tablero y a la vez puede variar la altura del hilo. En primer lugar se coloca un bloque de espuma de igual envergadura que la pieza deseada pero con mayor altura y longitud. A continuación, se enciende la máquina y el hilo se empieza a calentar. Una vez calentado, se inicia el desplazamiento de la parte móvil y el hilo recorre a sección que se le haya ordenado.

En este caso, la pieza a cortar es un ala de sección constante. En primer lugar se dibuja un plano del perfil en un archivo *.dxf*. Para realizarlo se han descargado las coordenadas de la página web [8], posteriormente se han introducido en el programa *AutoCad* haciendo uso de la función *Spline*. Una vez obtenido el archivo se debe abrir en *DevFoam*. Este programa se encargará de programar el recorrido que debe realizar el hilo.

Una vez en el programa, se selecciona la curva y se pincha en el icono de la función *Simple Foam cutting of selected Parts*. Se debe visualizar una imagen semejante a la mostrada en la Fig.(4.14).

Se abrirá una nueva ventana. El hilo corta por el calor que emite, de modo que realmente no mantiene contacto físico con la espuma si no que corta a cierta distancia. Por este motivo se debe establecer una distancia entre el recorrido del hilo y la sección del ala deseada. Para ello, se activa la opción *Apply Kerf* y establece un valor de *5 mm*.

En *OffsetofParttoCut* establecemos unos valores de $X = 5\text{ mm}$ y $Y = 5\text{ mm}$. Estas serán las coordenadas de origen de corte del hilo. Se hace click en *Create cut Pat* para crear el recorrido tal y como se muestra en la Fig. (4.15).

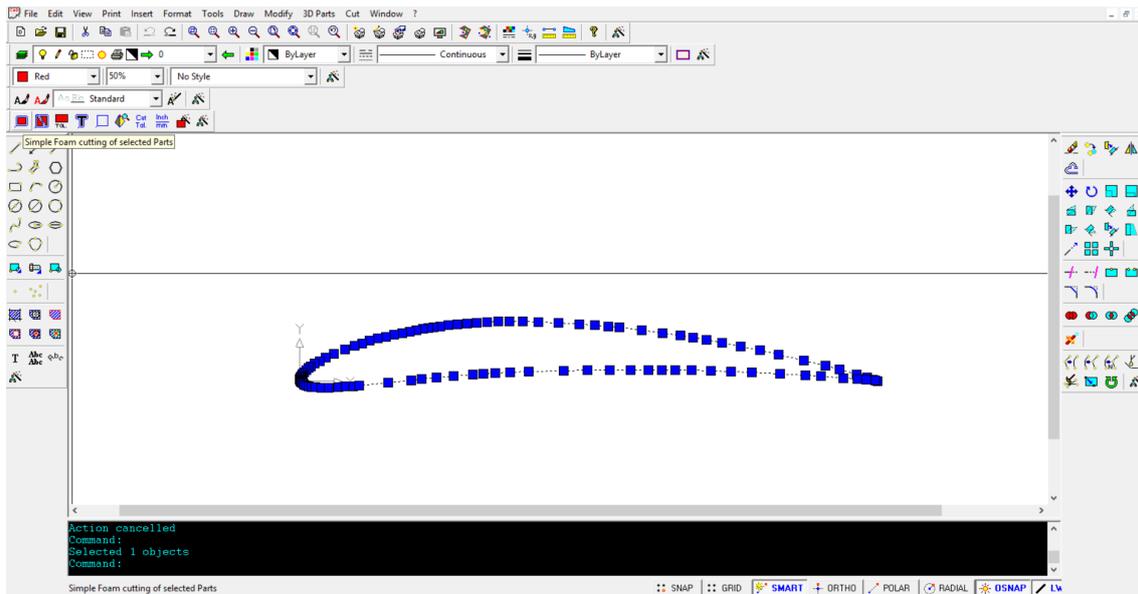


Figura 4.14: Sección del ala en programa *DevFoam*. (Fuente: Propia)

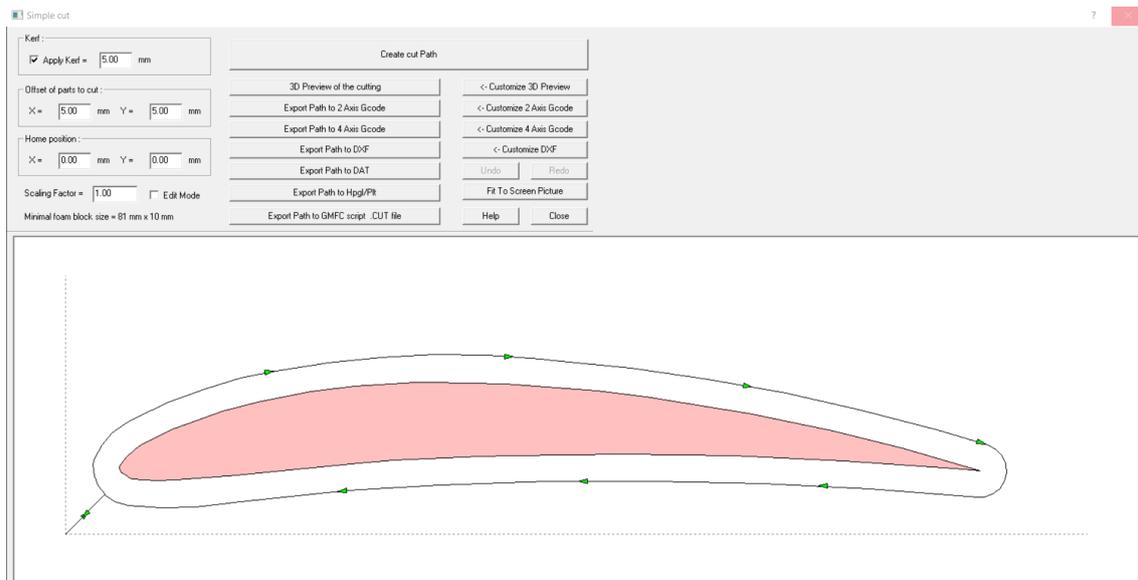


Figura 4.15: Recorrido de corte en el programa *DevFoam*. (Fuente: Propia)

A continuación se selecciona *Export Path to DAT* para guardar el archivo en un formato *.DAT* y se introduce en la máquina de corte por hilo. Una vez introducido el recorrido se procede a cortar las piezas. Tras realizar el corte se debe extraer cuidadosamente las alas del bloque de espuma.

Una vez obtenidas las alas se deben unir al soporte. Se han realizado unas hendiduras en la parte posterior de las alas haciendo uso de un cúter. El soporte irá situado a 6 cm del borde de fuga, de este modo el centro aerodinámico y el centro de gravedad quedarán situados cerca uno del otro. Tras realizar la ranura se ha introducido la varilla de metal y se ha rellenado el espacio sobrante con silicona. Tras dejar secar la silicona durante 24 horas, se ha forrado las alas con un plástico adhesivo. De este modo, se consigue un acabado superficial mejor y mayor sujeción. Por último, se atornilla el marco delantero al soporte de las alas.

A continuación se muestran imágenes sobre las alas y el soporte acabados:

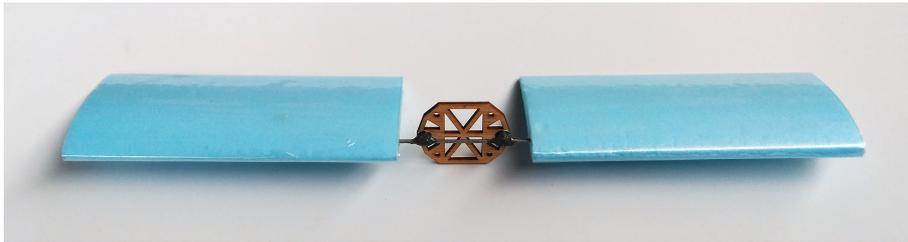


Figura 4.16: Alas y soporte. (Fuente: Propia)

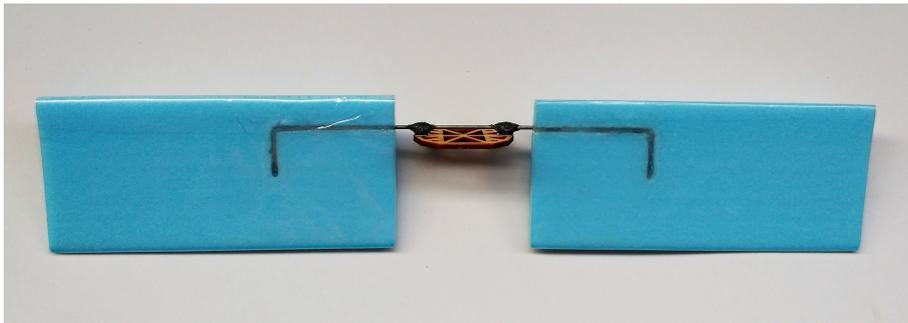


Figura 4.17: Vista posterior de las alas y el soporte. (Fuente: Propia)

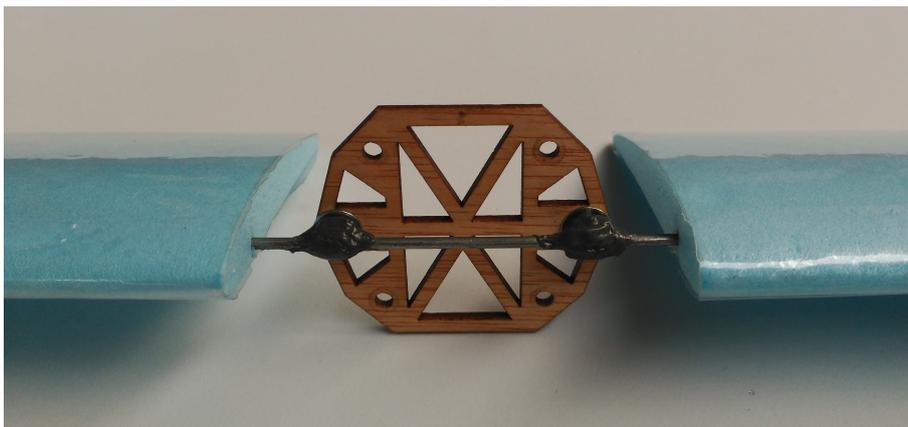


Figura 4.18: Soldadura en frío en el soporte de las alas. (Fuente: Propia)

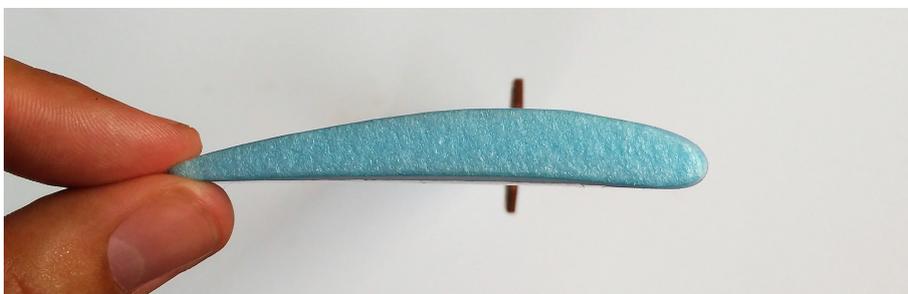


Figura 4.19: Perfil alar de las alas. (Fuente: Propia)

CAPÍTULO 5

Control

La controladora que se ha elegido funciona con diferentes programas de control diferentes. Por tanto, no es necesario programar el código del piloto automático lo cual supone un gran ahorro de trabajo. Entre los diferentes *softwares* posibles se ha utilizado uno gratuito llamado *BetaFlight*. Así pues, en este capítulo se explicará paso por paso, como se ha programado la controladora del dron.

Cabe mencionar que la programación se realiza una vez el don esté completamente ensamblado, soldado y montado con todos los componentes.

Inicio

En primer lugar, se descarga el programa. Al entrar la ventana de inicio será la siguiente:

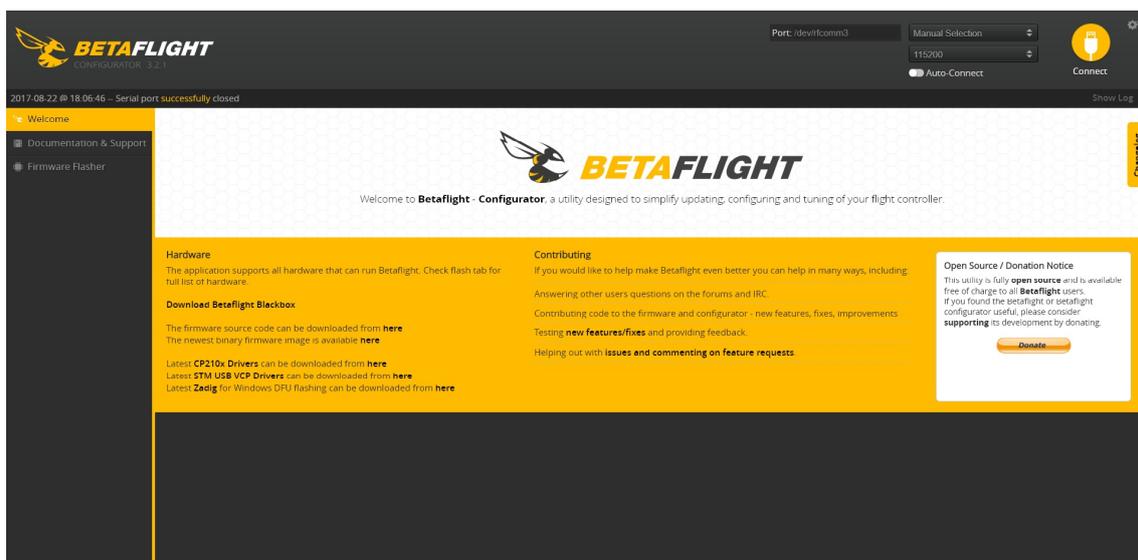


Figura 5.1: Ventana de inicio del programa *BetaFlight*. (Fuente: Propia)

A continuación se conecta la placa controladora (FC) al ordenador mediante un cable USB. El dron no tener la batería conectada de momento.

Conexión

A continuación se entra en la ventana de *FirmwareFlasher* para instalar en la FC el *firmware*.

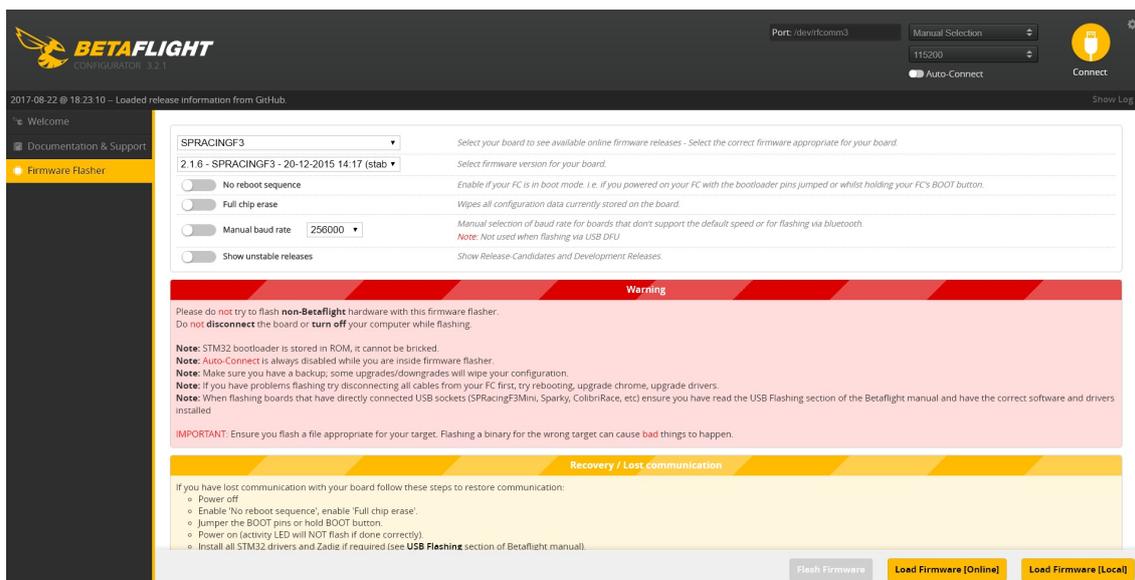


Figura 5.2: Ventana de instalación del *firmware* del programa *BetaFlight*. (Fuente: Propia)

Se selecciona la FC que en este caso es la *SPRACINGF3* y la última actualización del *firmware*, en este caso es: *3,1,7 – SPRACINGF3 – 10 – 04 – 201712 : 36(stable)*. A continuación se pincha en *LoadFirmware(Online)* y por último *Flash Firmware* para instalarlo en el dron.

Una vez hecho esto ya se puede establecer la conexión del dron con el ordenador, para ello se pulsa el icono de *Connect* en la esquina superior derecha.

Calibrado del acelerómetro

Una vez conectados deberá aparecer la siguiente ventana:

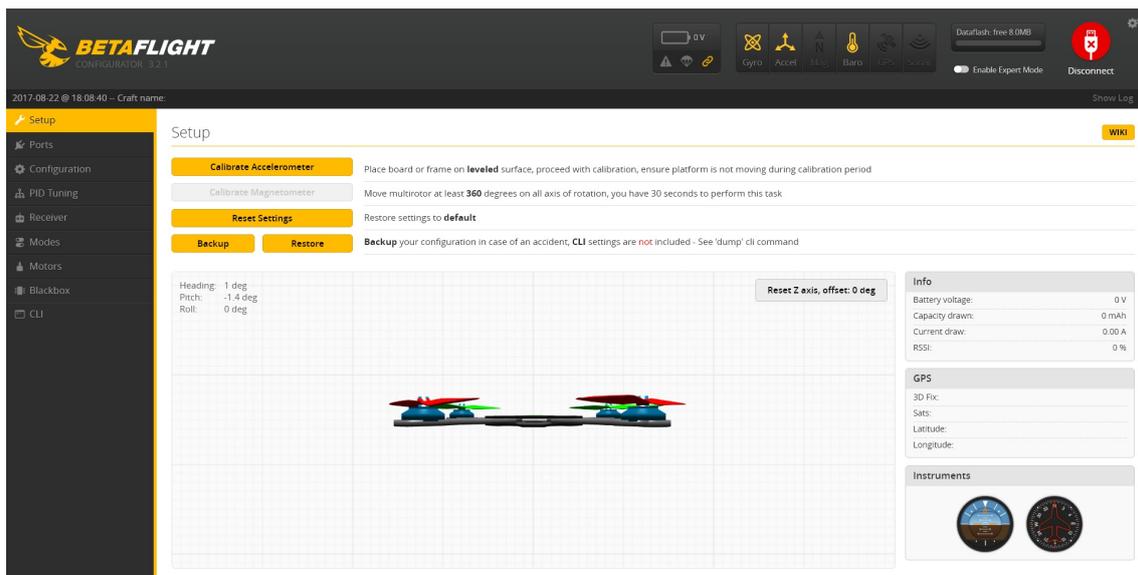


Figura 5.3: Ventana de preparación del programa *BetaFlight*. (Fuente: Propia)

Se debe colocar el dron en una superficie horizontal y se pincha en *Calibrate Accelerometer*. Una vez calibrado, hay que pinchar en el icono *Save and Reboot* para guardar.

Configuración de puertos

Posteriormente se pasa a la ventana de *Ports*.

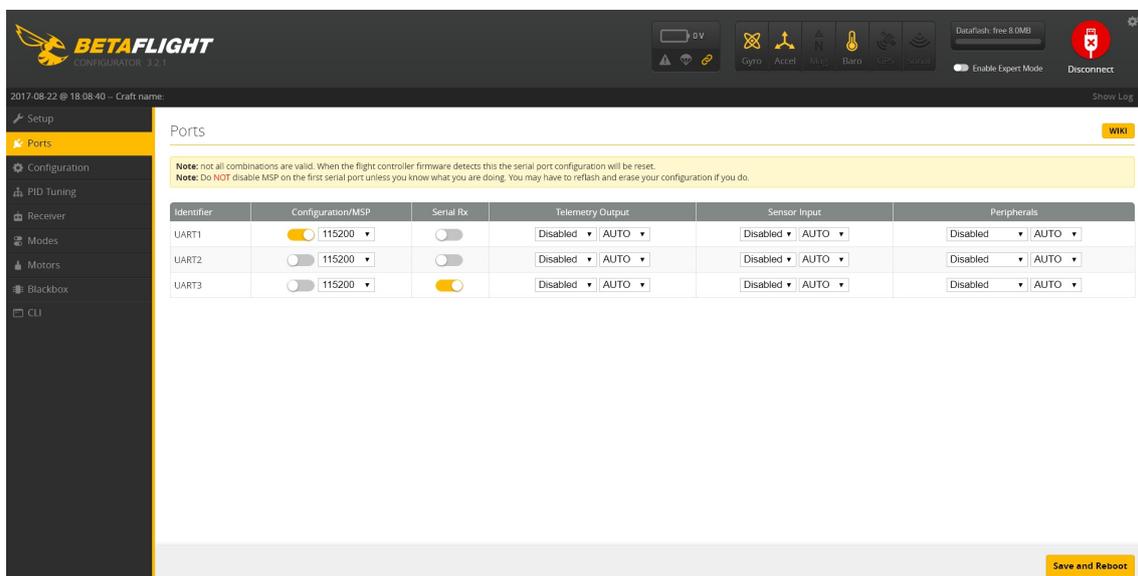


Figura 5.4: Ventana de puertos del programa *BetaFlight*. (Fuente: Propia)

Este modelo de FC cuenta con tres puertos con los cuáles puede intercambiar datos con elementos o dispositivos externos. El primero está predeterminado y se utiliza para la conexión USB. El receptor de radio se ha soldado en el puerto número 3 por tanto, se debe configurar este puerto como entrada de radio. Para ello, en el *UART3* se activa la opción *Serial Rx*. Una vez activado, se pulsa en *Save and Reboot* para guardar la configuración.

Configuración general

A continuación se selecciona la ventana *Configuration*:

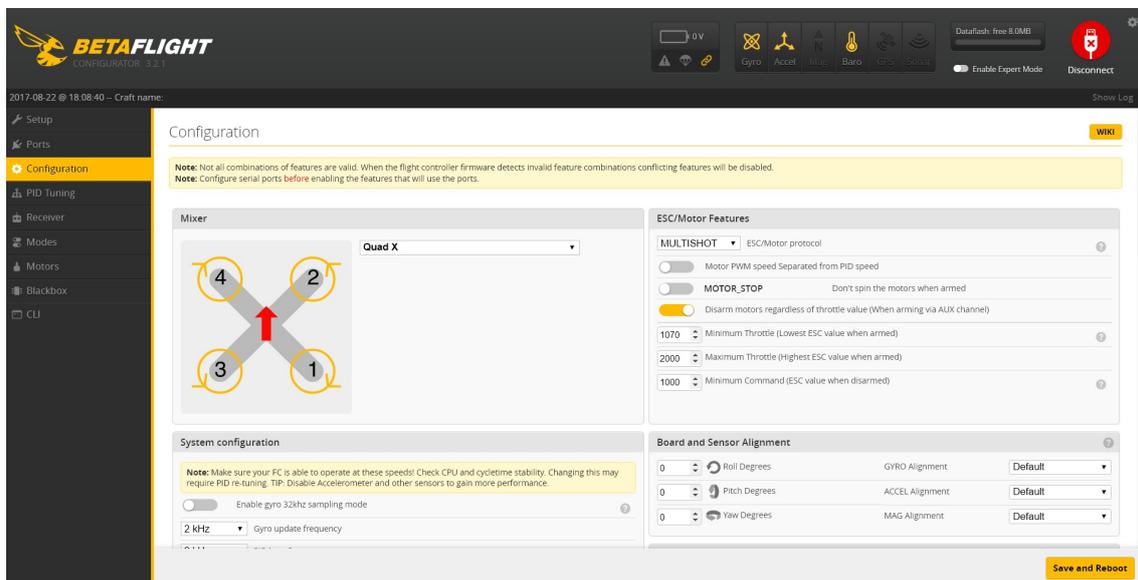


Figura 5.5: Ventana de configuración del programa *BetaFlight*. (Fuente: Propia)

En primer lugar se selecciona dentro de *Motor* el modelo *Quad X* ya que está es la disposición de motores por la que se ha optado en el diseño del dron.

Los ESCs que utiliza el dron puede funcionar con diferentes protocolos cada uno de los cuáles un periodo de emisión y recepción de señales diferente. Para configurar el protocolo, en el cuadro de *ESC/Motor Features* seleccionamos en *ESC/Motor protocol* el protocolo *Multishot*. Además, activamos la opción *Disarm motors regardless of throttle value* de este modo se podrá parar los motores durante el vuelo en caso de emergencia.

A continuación en *System configuration* hay que establecer una frecuencia de *2kHz* en *Gyro update frequency* y en *PID Loop frequency*. En el mismo cuadro se ha de activar las opciones *Accelerometer* y *Barometer*, ya que la FC tiene ambos elementos.

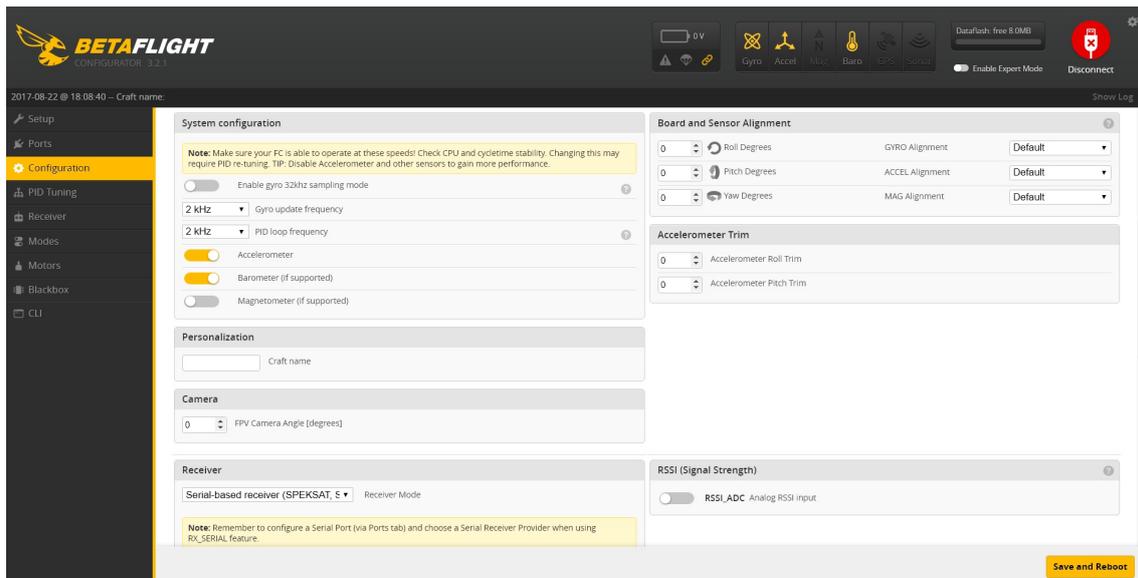


Figura 5.6: Continuación de la ventana de configuración del programa *BetaFlight*. (Fuente: Propia)

Posteriormente se ha de configurar el receptor de radio. Para ello, dentro de *Receiver* seleccionamos en *Receveire Mode* el modo: *Serial – based receiver (SPEKSAT, SBUS, SUMD)*. Por último, en *Serial Receiver Provider* se selecciona *SBUS*. Esta configuración se debe a que el receptor que utiliza el dron funciona con el modo SBUS.

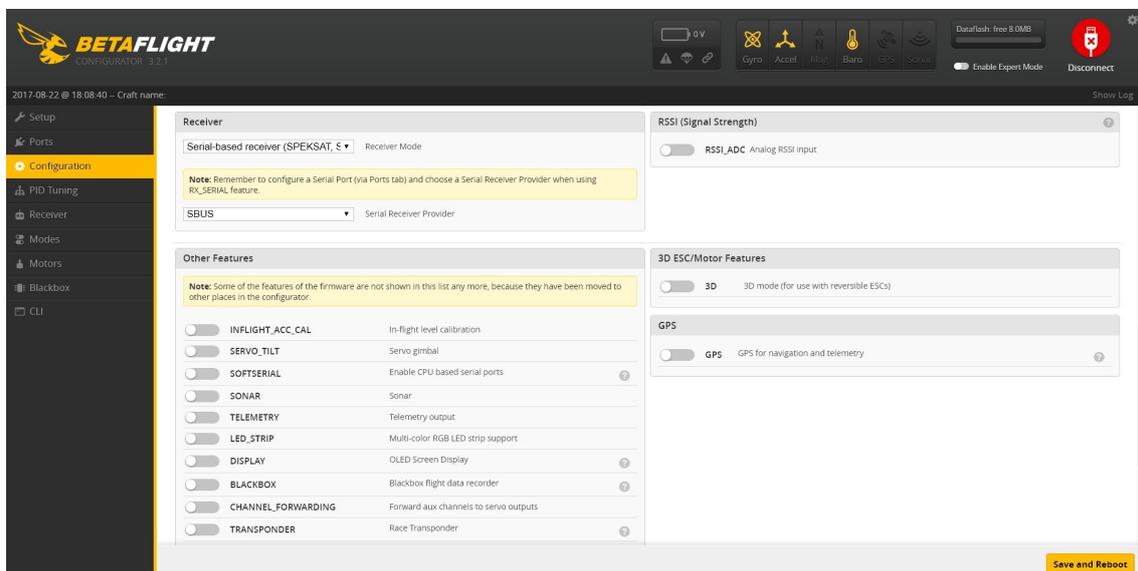


Figura 5.7: Final de la ventana de configuración del programa *BetaFlight*. (Fuente: Propia)

Configuración del PID

La siguiente ventana es *PID Tuning*:

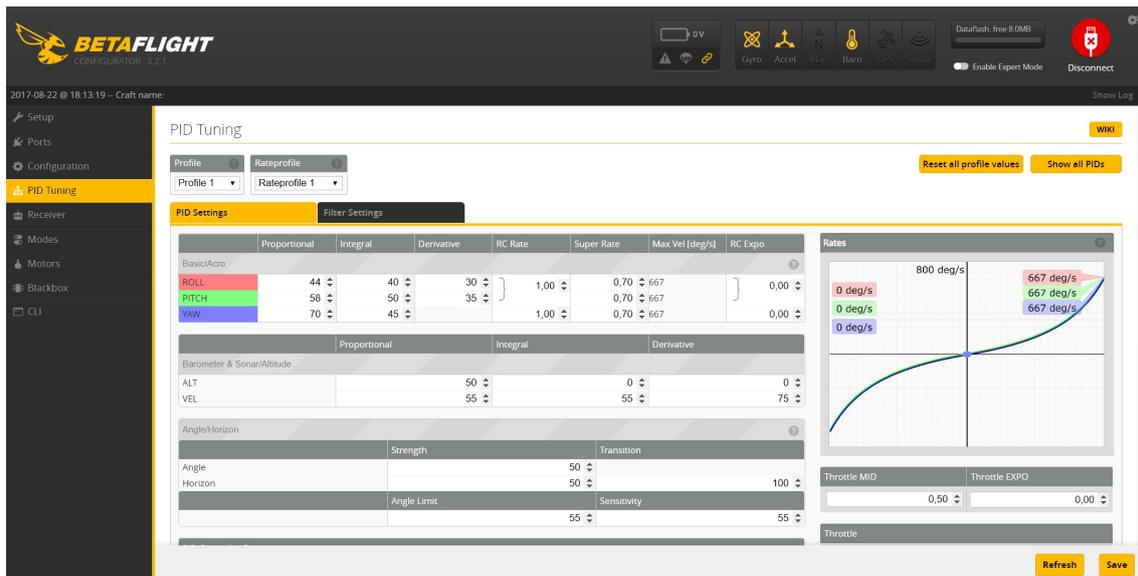


Figura 5.8: Ventana de configuración del PID del programa *BetaFlight*. (Fuente: Propia)

En esta ventana se accede a la configuración del PID. Los valores están predeterminados para conseguir un vuelo estándar. Además, se puede establecer el ángulo de vuelo máximo. Dado que se ha establecido un ángulo de ataque de vuelo de 4° , se modificará el valor de 55° a 86° en el cuadro titulado *Angle Limit*.

Configuración del receptor

A continuación está la ventana *Receiver*:

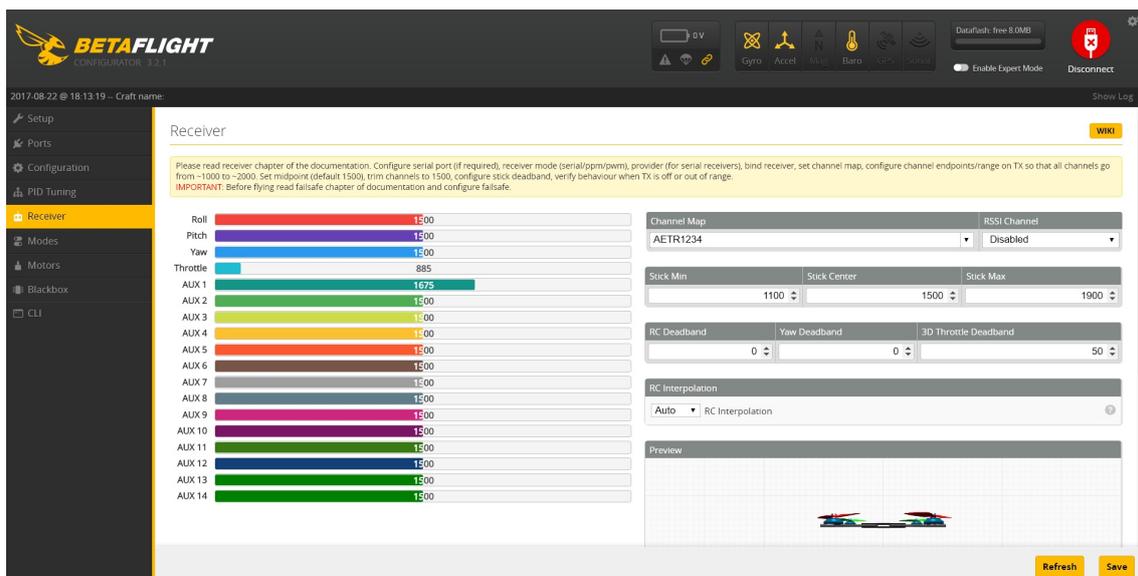


Figura 5.9: Ventana del receptor del programa *BetaFlight*. (Fuente: Propia)

Al igual que antes, la configuración se realiza automáticamente con lo cual no es necesario realizar ninguna modificación.

Configuración de la Emisora

El siguiente paso es sincronizar la emisora con el dron. Para ello, en primer lugar se debe configurar la emisora. El modelo que se ha utilizado dispone de una pantalla con 6 botones *Menu*, *Page*, *Exit*, *+*, *-* y *Enter*.



Figura 5.10: Pantalla de configuración y botones de la emisora modelo FR Sky X9D. (Fuente: www.img.banggood.com)

Presionando *Menu* se pueden configurar el receptor. *Page* se utiliza para cambiar de página dentro del menú de configuración. Con *Exit* se retrocede una ventana en el menú. Los botones *+* y *-* sirven para desplazarse entre las opciones arriba y abajo respectivamente. Por último, *Enter* sirve para seleccionar.

Los pasos para configurar la emisora son los siguientes:

1. Se presiona *Menu* y manteniendo el botón *Enter* se crea un modelo. Se configura el modelo poniendo un nombre indicativo. Después se entra en *Receptor N0* y se selecciona *Enlace*. En este momento el receptor empezará a emitir unos pitidos que indicará que está buscando un receptor
2. Mientras duran los pitidos, se presiona y se mantiene el botón *BIND* que se encuentra en el receptor. Mientras se está pulsando se debe conectar la batería al dron. Tras un breve instante se encenderá una luz verde en el receptor que indicará que el receptor y el transmisor están sincronizados.
3. A continuación se configurará el armado del dron. Se presiona *Page* hasta llegar a la página 5, página de Mezclas. Se selecciona *CH5* el cual corresponde al canal auxiliar AUX 1 y se pulsa *Enter*. Una vez dentro se pone de nombre "Armar". Se selecciona *Fuente* y se pulsa uno de los Switch de los que dispone el transmisor. Los Switch son los interruptores planos que se encuentran en la parte superior del mando. Se puede seleccionar cualquiera de ellos. Se debe tener en cuenta que a partir de ahora, ese interruptor iniciará el armado del dron. El armado, es el estado previo al vuelo, en él se inicia la rotación de los motores pero no se eleva el dron.
4. Por último se configurarán los modos de vuelo. Para ello, en la página 5 se selecciona el canal *CH7* que corresponde al AUX3. Se pone de nombre "Angle y Horizon" y accionamos un Switch. Este interruptor no puede ser el mismo que se haya seleccionado en el paso anterior.

Configuración de los modos

Una vez se ha configurado y sincronizado la emisora, hay que volver al programa *BetaFlight* y entrar en la ventana *Modes*:

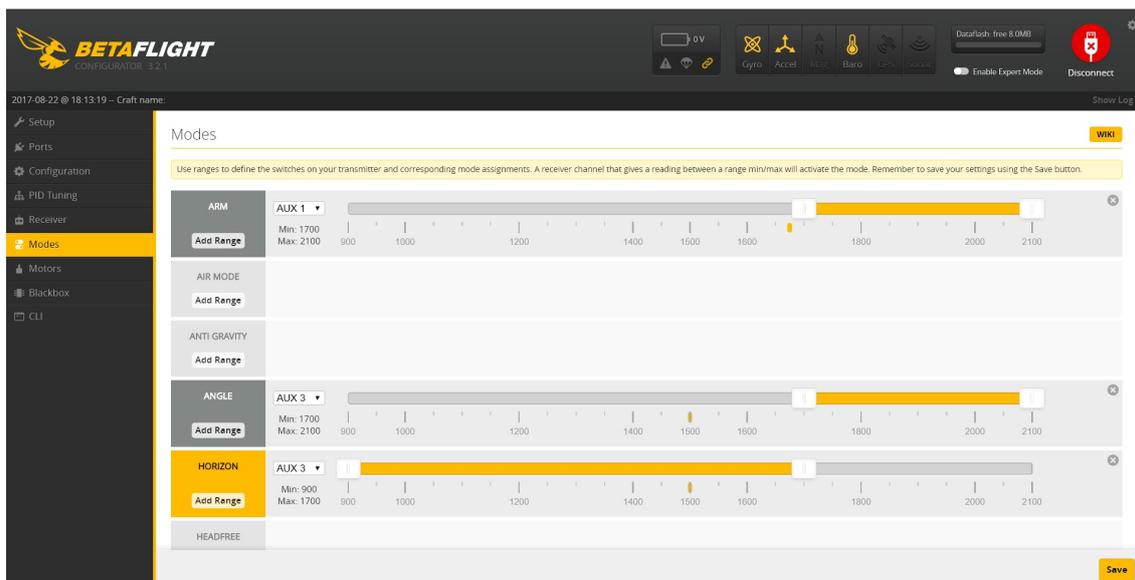


Figura 5.11: Ventana de Modos del programa *BetaFlight*. (Fuente: Propia)

A continuación se procederá configurando los diferentes modos. Los interruptores superiores de la emisora llamados Switch son los que accionarán los diferentes modos. Tienen 3 posiciones diferentes: abajo, en medio y arriba. Cada una de las posiciones corresponde a los valores 1000, 15000 y 2000 aproximadamente.

En la ventana *Modes* presionamos el icono *Add Range* del modo *Arm*. A continuación seleccionamos el Aux 1 y establecemos un rango de valores comprendidos entre 1700 y 2100. Por tanto, este modo se iniciará cuando coloquemos hacia arriba el Switch que se haya establecido el CH5 de la emisora.

Repetimos el proceso pero en el modo *Angle* seleccionando el mismo rango de valores pero en este caso en el AUX 3. Por último, en el modo *Horizon* se selecciona también el AUX 3 pero esta vez establecemos un rango de valores comprendidos entre 900 y 1700. De este modo, cuando el Switch correspondiente al CH7 de la emisora esté hacia arriba se activará el modo *Angle*, pero si está en medio o hacia abajo se activará el modo *Horizon*. Ambos modos de vuelo son modos estables, no obstante el modo *Angle* permite realizar acrobacias en el aire. Se recomienda encarecidamente empezar volando única y exclusivamente en el modo *Horizon*.

CAPÍTULO 6

Viabilidad

Tras haber configurado el control del dron se debe analizar las prestaciones que presenta y el coste económico que supone su fabricación. De este modo se puede determinar su viabilidad y averiguar si se trata de un producto competente en el mercado actual.

6.1 Operatividad

En primer lugar, se han realizado diversas pruebas de vuelo. Uno de los objetivos principales de este proyecto es averiguar las ventajas o diferencias que supone la implementación de alas en un dron cuadricóptero, por este motivo, se ha procedido analizando el vuelo del vehículo con y sin alas. Existe cierta dificultad a la hora de valorar el vuelo de un dron, en este caso se ha decidido estudiar tres parámetros principales: maniobrabilidad, autonomía y velocidad.

6.1.1. Maniobrabilidad

Una de las características principales que definen la capacidad operativa de un dron es su maniobrabilidad. En ocasiones es indispensable poder sortear impedimentos o aterrizar y despegar en lugares agrestes. Por estos y más motivos, es importante la capacidad de maniobrar durante el vuelo.

Dron sin alas

En primer lugar se ha analizado el vuelo del dron sin las alas. Se han realizado varios vuelos tratando de zigzaguear entre obstáculos, realizar maniobras bruscas y mantener una posición estática.

Se han realizado todos estos vuelos con éxito. En esta configuración el vuelo presenta un gran control. Los casi 200 g de empuje consiguen que el dron realice todo tipo de movimientos, incluso dar volteretas en el aire.

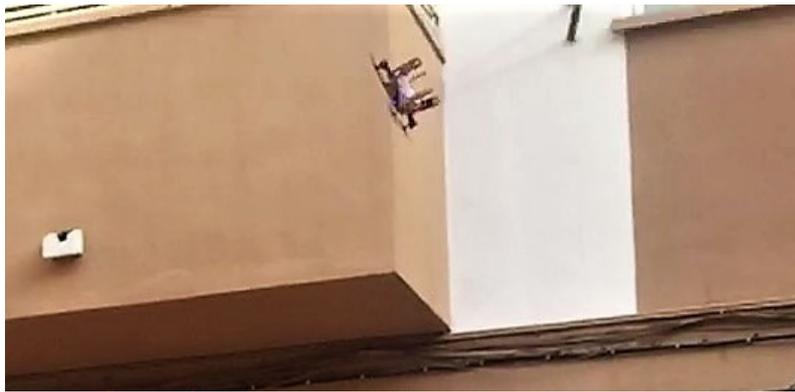


Figura 6.1: Voltereta durante el ensayo de maniobrabilidad del dron cuadricóptero sin alas. (Fuente: Propia)

En esta configuración el vehículo presenta una gran capacidad de maniobrabilidad que le permite compararse y superar a la mayoría de drones cuadricópteros presentes hoy en día en el mercado.

Dron con alas

Hasta ahora se ha comprobado la capacidad del dron sin las alas para realizar movimientos durante el vuelo. A continuación se deberá comprobar que ocurre cuando se le añaden las alas ya que suponen un peso y una carga aerodinámica adicional.

Al igual que antes, se han realizado diferentes vuelos tratando de valorar la capacidad de maniobra que tiene el dron. Se ha tratado de esquivar obstáculos y de realizar desplazamientos rápidos y con cambios de dirección.

En esta ocasión el dron presenta algunos inconvenientes. A bajas velocidades el dron es capaz de realizar los tres movimientos característicos de los vehículos voladores (alabeo, cabeceo y guiñada) sin demasiada dificultad. No obstante, a medida que se acelera, la acción del viento sobre las alas generan momentos aerodinámicos que desplazan y giran involuntariamente el dron. El empuje y la disposición de los motores del dron, no son suficientes para poder establecer un control completo de sus movimientos. Estas complicaciones se ven en mayor grado cuando se trata de realizar un vuelo en horizontal. Los primeros metros el dron es capaz de mantener este vuelo, pero cuando alcanza ciertas velocidades se vuelve inestable.



Figura 6.2: Ensayo de maniobrabilidad del dron cuadricóptero con las alas. (Fuente: Propia)

Concluyendo, la implementación de las alas suponen una dificultad añadida en el control de un dron. Existen diferentes formas de mejorar el control del vehículo. En primer lugar se podría utilizar unos motores más potentes, no obstante esto supondría un aumento de peso y de consumo. Otra solución sería situar los motores en los extremos de las alas, de este modo podrían generar mayores momentos y mejorar su estabilidad. Sin embargo, esta solución implica una estructura y unos soportes de mayor tamaño, lo cuál implica mayor peso y por tanto, alas más grandes lo cuál genera cargas aerodinámicas mayores. La última solución es la más recomendable, se trata en añadir flecha a las alas. De este modo, se reduce el peso en punta de ala, se dota de estabilidad natural al diseño e incluso puede reducir el peso total del ala. Otra opción recomendable, sería reducir la envergadura o cuerda del ala, no obstante, esta medida implicaría aumentar el empuje durante el vuelo horizontal del dron y con ello su consumo.

6.1.2. Autonomía

Existe cierta complejidad a la hora de establecer con certeza la autonomía de vuelo de un vehículo. Se debe establecer un criterio de vuelo dado que cada maniobra supone un aumento de consumo eléctrico diferente. Por ello, con el objetivo de obtener los datos más fiables se ha decidido realizar varios vuelos estáticos (en la medida de lo posible) hasta fallo de sustentación. Además, antes de cada vuelo se ha comprobado que las baterías estuvieran al máximo de capacidad.

Dron sin alas

En primer lugar, se ha empezado con el vuelo del dron cuadricóptero sin las alas. En esta configuración el dron es relativamente fácil de controlar y no ha habido incidentes. Los vuelos se han realizado en exterior pero en un entorno con paredes que minimizaban las perturbaciones provocadas por la acción del viento.



Figura 6.3: Ensayo de autonomía con el dron cuadricóptero sin las alas. (Fuente: Propia)

Se han realizado tres vuelos y se han obtenido los siguientes datos:

| Autonomía | Media | Desviación |
|-----------|--------|------------|
| 10' 30" | | |
| 10' 07" | 10' 3" | 29.21" |
| 9' 32" | | |

Tabla 6.1: Autonomía del dron sin alas y en vuelo estático. (Fuente: Propia)

Se han obtenido tiempos semejantes para los vuelos. Entre los posibles causantes de las discrepancias está la desigualdad de la capacidad de las baterías, las pequeñas diferencias entre los vuelos y el error humano a la hora de cronometrar los vuelos.

Dron con alas

Del mismo modo que en el apartado anterior, se han realizado tres vuelos pero esta vez se les ha incluido las alas al dron. Se han realizado vuelos estacionarios dado que el vuelo en horizontal ha resultado complicado de maniobrar y controlar durante tanto tiempo.



Figura 6.4: Ensayo de autonomía con el dron cuadricóptero sin las alas. (Fuente: Propia)

A continuación se muestran los datos obtenidos:

| Autonomía | Media | Desviación |
|-----------|--------|------------|
| 6' 27" | | |
| 7' 03" | 6' 53" | 25.5" |
| 7' 08" | | |

Tabla 6.2: Autonomía del dron con alas y en vuelo estático. (Fuente: Propia)

Entre las posibles fuentes de error están las comentadas en el caso anterior. Además, debido a la gran superficie de las alas, las pequeñas ráfagas de aire aleatorias desplazaban el dron causando que en cada vuelo el consumo sea ligeramente diferente.

Comparativa

Una vez obtenidas las autonomías de ambas configuraciones, se deben comparar para establecer las diferencias que suponen la implementación de alas en un dron cuadricóptero. Además para obtener una visión más generalizada, se ha comparado la autonomía con la de los drones semejantes ya analizados en la Tabla (3.1):

| Modelo | Swing | Spark | TFG sin alas | TFG con alas |
|-----------------|-------|-------|--------------|--------------|
| Autonomía (min) | 8 | 16 | 10 | 7 |
| Peso (g) | 295 | 300 | 105 | 122 |

Tabla 6.3: Comparativa de la autonomía con los drones semejantes. (Fuente: Propia)

Se ha comparado únicamente los drones semejantes con un tamaño similar al de este proyecto y por ello se han incluido sus pesos en la Tabla (6.3). El primer dato revelador es que el dron sin las alas tiene una autonomía considerablemente mayor que con ellas. Esto es lo que cabía esperar dado que las alas suponen un mayor peso que a su vez supone mayor consumo. Respecto al resto de drones, se observa que tienen autonomías considerablemente mejores que la del dron con alas, refutando aún más que la implementación de alas supone una reducción en la autonomía. Cabe destacar que la autonomía se ha calculado realizando un vuelo convencional y no horizontal como lo haría un dron de ala fija.

Sería interesante poder analizar la autonomía en vuelo de planeo, no obstante, dadas las dificultades de control, esta comparación no se ha podido hacer. A pesar de este impedimento, se pueden hacer ciertas presuposiciones fundamentadas. El vuelo horizontal requiere un empuje mínimo del 60 %. Este empuje requeriría unas alas con una superficie considerable lo cuál dificultaría el control del dron. Por tanto, es conveniente que el dron vuele a un 80 % de su máxima potencia y de este modo poder utilizar unas alas más pequeñas. Este aumento de potencia implica un mayor consumo y por tanto, el vuelo horizontal debe consumir más que el convencional.

6.1.3. Velocidad

El análisis de la velocidad resulta más complicado ya que implica un cierto grado de maniobrabilidad. Al igual que antes, establecer una velocidad precisa implica procedimientos complicados como hacer uso de un *Video Tracker*. Este tipo de programas analizan un vídeo y realizan el seguimiento de un objeto para analizar su velocidad. Se ha rechazado esta idea porque se requiere un entorno controlado y desplazamientos precisos. No obstante, haciendo uso del mismo principio, se ha decidido grabar el vuelo del vehículo en cámara lenta y analizar posteriormente las imágenes. La superficie sobre la cuál se ha volado el dron está cuadrículada. Observando cada fotograma del vídeo con el reproductor *VLC player*, teniendo en cuenta la velocidad de los fotogramas y la distancia recorrida se puede establecer la velocidad máxima del dron.

Dron sin alas

Al igual que con la autonomía se ha analizado en primer lugar la velocidad del dron sin las alas:

| Velocidad (m/s) | Media (m/s) | Desviación (m/s) |
|-----------------|-------------|------------------|
| 10.73 | | |
| 11.05 | 10.68 | 0.42 |
| 10.26 | | |

Tabla 6.4: Velocidad máxima del dron sin las alas. (Fuente: Propia)

Se observa una desviación menor del 10 % de la velocidad, lo cuál indica que el proceso realizado es adecuado para el proyecto. La principal fuente de error es la medición del desplazamiento mediante el análisis de los fotogramas. Dada la poca resolución del vídeo y que los vuelos no son completamente rectilíneos es complicado determinar una distancia exacta.

Dron con alas

El siguiente paso ha sido realizar un vuelo horizontal haciendo uso de las alas. Este vuelo ha sido más complicado de realizar ya que el control sobre el vehículo era menor. Procediendo de igual manera que en el caso anterior se han obtenido los siguientes valores de velocidad:

| Velocidad (m/s) | Media (m/s) | Desviación (m/s) |
|-----------------|-------------|------------------|
| 9.2 | | |
| 9.79 | 9.90 | 0.81 |
| 10.7 | | |

Tabla 6.5: Velocidad máxima del dron con las alas. (Fuente: Propia)

Debido a las dificultades de control de este modo de vuelo las medidas tomadas presentan una desviación mayor. Además, el vuelo se ha realizado con un ángulo de ataque mayor al establecido teóricamente. Otras fuentes de error son las relacionadas con el método de análisis de fotogramas como ya se ha comentado anteriormente.

Comparativa

Al igual que en el caso de la autonomía, a continuación se presenta una comparación de las velocidades de drones semejantes y de ambas configuraciones:

| Modelo | Swing | Spark | TFG sin alas | TFG con alas |
|------------------|-------|-------|--------------|--------------|
| Velocidad (km/h) | 30 | 50 | 38.45 | 35.64 |
| Peso (g) | 73 | 300 | 105 | 122 |

Tabla 6.6: Comparativa de la velocidad con los drones semejantes. (Fuente: Propia)

Se puede apreciar una velocidad de vuelo menor para el dron con alas que sin ellas. Esto se debe a que los vuelos realizados en modo horizontal presentaban inestabilidades, además el ángulo de ataque de vuelo era mayor al teórico lo cuál supone una mayor resistencia aerodinámica. A pesar de ello, el dron sin las alas vuela a mayor velocidad que el *Parrot Swing* que es el vehículo con características más similares.

6.2 Estudio económico

Por último, se realizará un análisis del coste económico y de venta del dron. En primer lugar se determina el coste material de todos los componentes. Dada la gran cantidad de elementos que forman este vehículo se han agrupado en estructurales y eléctricos.

| Componentes electrónicos | Precio € |
|---------------------------------|-----------------|
| <i>Controladora de vuelo</i> | 25.46 |
| <i>Placa distribuidora</i> | 4.33 |
| <i>Motores y ESCs</i> | 50.45 |
| <i>Hélices</i> | 2.64 |
| <i>Batería</i> | 6.49 |
| <i>Transmisor y receptor</i> | 38.71 |
| Total | 128.08 |

Tabla 6.7: Coste económico de los componentes electrónicos del dron.

El precio del transmisor y el receptor no corresponde a los modelos utilizados en este proyecto. Para este trabajo se han utilizado unos de gran calidad que ya se poseían. Dado que en esta sección se intenta estimar un precio de mercado, se ha elegido unos modelos más baratos y adecuados para este dron pero igualmente funcionales.

| Material estructural | Precio € |
|------------------------------|-----------------|
| <i>Cableado</i> | 0.10 |
| <i>Madera</i> | 0.34 |
| <i>Poliuretano</i> | 0.25 |
| <i>Gomas elásticas</i> | 0.20 |
| <i>Separadores de nylon</i> | 0.30 |
| <i>Tornillos de nylon</i> | 0.30 |
| <i>Tornillos de acero</i> | 0.10 |
| <i>Tuercas de acero</i> | 0.05 |
| <i>Material bicomponente</i> | 0.10 |
| <i>Estaño</i> | 0.10 |
| Total | 1.84 |

Tabla 6.8: Coste económico de los componentes estructurales del dron.

Por último, se incluyen los precios del coste de corte de las piezas de madera y de las alas y un coste estimado de ensamblaje.

| Procesos de fabricación | Precio € |
|--------------------------------|-----------------|
| <i>Corte por láser</i> | 2.50 |
| <i>Corte por hilo</i> | 1.50 |
| <i>Ensamblaje</i> | 30 |
| Total | 34 |

Tabla 6.9: Coste económico de los procesos de fabricación del dron.

Para el coste del ensamblaje, se ha considerado que el montaje lo realiza un operario sin formación alta que cobra 6 € la hora y necesita 5 horas para armar un único dron.

Finalmente se calcula el coste total:

| | Precio € |
|---------------------------------|-----------------|
| <i>Componentes electrónicos</i> | 128.08 |
| <i>Material estructural</i> | 1.84 |
| <i>Procesos de fabricación</i> | 34 |
| Total | 163.92 |

Tabla 6.10: Coste económico total del dron.

Suponiendo que se busca un 40 % de beneficios y teniendo en cuenta un IVA del 21 % el precio de venta del dron sería el siguiente:

| | Precio € |
|-----------------------------|-----------------|
| <i>Coste de fabricación</i> | 163.92 |
| <i>Beneficio (40 %)</i> | 65.57 |
| <i>IVA (21 %)</i> | 34.42 |
| Precio de venta | 263.91 |

Tabla 6.11: Precio de venta del dron.

Por último, comparamos su precio y sus características con drones semejantes y de tamaño similares:

| Modelo | Walkera QR X350 Pro | Cheerson CX-20 | Parrot Swing | TFG |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|------------|
| <i>Peso (g)</i> | 120 | 180 | 295 | 122 |
| <i>Velocidad (km/h)</i> | 70 | 35 | 30 | 36 |
| <i>Autonomía (min)</i> | 25 | 15 | 8 | 6 |
| <i>Cámara</i> | No | No | No | No |
| <i>GPS</i> | Sí | No | No | No |
| <i>Compatible con GoPro</i> | Sí | Sí | No | No |
| <i>Precio (€)</i> | 307 | 212 | 139 | 264 |

Tabla 6.12: Características y precios de drones semejantes con pequeñas dimensiones.

Para analizar la Tabla (6.12) se procederá haciendo una lista de ventajas e inconvenientes:

Ventajas

- Es el dron más ligero.
- Tiene una velocidad superior a la del *Parrot Swing* que es el dron más semejante.
- Tiene diferente modos de vuelo lo cuál lo convierte en un dron de mayor interés.

Inconvenientes

- Tiene la menor autonomía, únicamente es de 6 *min.*
- No tiene cámara, ni es compatible con una GoPro.

- No dispone de GPS.

Teniendo en cuenta las ventajas y los inconvenientes cabe decir que el precio no es competente. Se deberían realizar mejoras en el dron o abaratar su coste. Para disminuir su precio se podría automatizar el proceso de ensamblaje. Otra posibilidad sería diseñar y fabricar un transmisor de radio propio más adecuado y barato. Por último, también se podría elegir una controladora de vuelo o motores de menor coste pero que aún así pudieran cumplir con los requisitos operativos del dron.

CAPÍTULO 7

Conclusiones

Mediante el estudio sobre las aplicaciones de los drones actuales se ha conseguido idear un diseño innovador y establecer una misión adecuada para el dron que se pretendía fabricar. El diseño del dron es de fácil montaje y reproducción y ha sido fabricado con éxito. Para ello se han tenido que solucionar los pequeños problemas prácticos que supone un proceso de fabricación de estas características: problemas en conexiones eléctricas, realizar la soldadura en frío correctamente etc. Además, la elección de los componentes electrónicos ha sido adecuada para los requisitos operativo. Sin embargo, se podría elegir modelos más baratos de controladora de vuelo o motores con el fin de reducir el coste económico.

Se ha conseguido controlar el dron, no obstante, el modo de vuelo horizontal presenta problemas de inestabilidad durante el vuelo a altas velocidades. Las alas en un vehículo de este tamaño supone una dificultad añadida al control debido a que generan fuerzas y momentos aerodinámicos no deseados que los motores no pueden contrarrestar.

A través de un análisis detallado se han establecido numéricamente las diferencias ocasionadas al implementar las alas en un dron cuadricóptero. En primer lugar, esta implementación supone una reducción de la maniobrabilidad de vuelo y un incremento del peso. Además, aumenta la susceptibilidad del vehículo a las ráfagas de aire. Para evitar estas perturbaciones, las alas deben tener una menor superficie alar y como consecuencia se requiere mayor potencia de motor para un vuelo horizontal. Debido a estos motivos el consumo es mayor y por tanto, la autonomía se ve reducida. Por último, la velocidad de vuelo en el modo horizontal no ha podido ser correctamente analizada, no obstante, los resultados obtenidos indican que las alas generan una fuerza de resistencia considerable reduciendo la velocidad máxima de vuelo.

El estudio de viabilidad comercial realizado ha determinado que es necesario abaratar el coste del dron o mejorar sus prestaciones si se quiere un producto atractivo para el consumidor y competente en el mercado.

7.1 Posibles optimizaciones y mejoras

- Reproducir el diseño pero sustituyendo la madera por fibra de carbono, de este modo se mejoraría su resistencia a golpes y roturas.
- Desplazar los motores a los extremos de las alas modificando eficientemente el diseño de la estructura para evitar el aumento de peso. Con este cambio se conseguiría un mayor control de vuelo.

- Añadir flecha a las alas para reducir la carga aerodinámica en punta de ala y mejorar su comportamiento aerodinámico. Esta modificación mejoraría la maniobrabilidad del dron y la velocidad máxima.
- Mejorar el control del vuelo en modo horizontal mediante el uso de un *software* más completo.
- Reducir el coste total del dron mediante la elección de una controladora de vuelo, unos motores y un transmisor más baratos y adecuados.

Presupuesto

Introducción

En este capítulo se pretende detallar el coste económico que supone todo el trabajo realizado para desarrollar este proyecto. Se tendrán en cuenta las horas empleadas en cada una de las diferentes actividades y los recursos materiales utilizados.

En primer lugar, se desglosarán los recursos empleados. Posteriormente se presentan los costes asociados a cada tarea efectuada y finalmente se muestra el coste total del proyecto.

Recursos

En esta sección se presentan todos los recursos necesarios para la ejecución de este proyecto.

Equipo informático y licencias

A continuación se muestran los recursos informáticos y de software empleados:

- Ordenador portátil
- Licencia de *Inventor*
- Licencia de *Betaflight*
- Licencia de *DevFoam*
- Licencia de *Matlab*
- Licencia de *AutoCAD*
- Licencia de *Excel*
- Licencia de *TEXTEX maker*

Recursos humanos

A continuación se muestran los recursos humanos requeridos para el desarrollo del proyecto:

- Alumno/Ingeniero autor del proyecto

- Piloto de drones
- Cotutor/Doctorado coordinador del proyecto
- Tutor/Ingeniero encargado del proyecto

Recursos materiales

A continuación se muestran los recursos materiales requeridos para la fabricación del dron.

Material fungible

En este apartado se detallan los componentes electrónicos, los materiales que conforman el dron y los que han sido consumidos para su fabricación.

- Madera
- Tornillería
- Cableado
- Adhesivos
- Bridas
- Cinta de doble cara
- Estaño
- Componentes electrónicos

Material no fungible

En este apartado se detallan todos los equipos y herramientas utilizadas para los cuales se ha calculado un coste de amortización.

- Máquina de corte por hilo
- Máquina de corte por láser
- Soldador de estaño
- Metro
- Cúter
- Cargador de baterías LiPo
- Banco de pruebas para ensayos de motor
- Pinzas
- Destornillador de estrella de 3 mm
- Llaves allen de 2 y 3 mm
- Lima

Presupuestos parciales

A continuación se detallan los presupuestos parciales de cada actividad y material requerido para el desarrollo de este proyecto:

Actividades

| Descripción | Horas Dedicadas | Coste (€/h) | Importe € |
|-------------------------|-----------------|-------------|-----------|
| <i>Ingeniero/Alumno</i> | 50 | 20 | 1000 |
| <i>Licencia Excel</i> | 10 | 0.04 | 0.40 |
| Total | | | 1000.40 |

Tabla 7.1: Presupuesto parcial del estudio inicial sobre los drones y sus aplicaciones en el mercado actual.

| Descripción | Horas Dedicadas | Coste (€/h) | Importe € |
|--------------------------|-----------------|-------------|-----------|
| <i>Ingeniero/Alumno</i> | 180 | 20 | 3600 |
| <i>Licencia Matlab</i> | 15 | 0.28 | 4.20 |
| <i>Licencia Inventor</i> | 90 | 0.44 | 39.60 |
| Total | | | 3643.80 |

Tabla 7.2: Presupuesto parcial del diseño y modelado CAD del dron.

| Descripción | Horas Dedicadas | Coste (€/h) | Importe € |
|-------------------------|-----------------|-------------|-----------|
| <i>Ingeniero/Alumno</i> | 50 | 20 | 1000 |
| <i>Licencia DevFoam</i> | 5 | 0.17 | 0.85 |
| <i>Licencia AutoCAD</i> | 5 | 0.31 | 17.36 |
| Total | | | 1018.21 |

Tabla 7.3: Presupuesto parcial de la tarea de fabricación del dron.

| Descripción | Horas Dedicadas | Coste (€/h) | Importe € |
|----------------------------|-----------------|-------------|-----------|
| <i>Ingeniero/Alumno</i> | 40 | 20 | 800 |
| <i>Licencia BetaFlight</i> | 5 | 0 | 0 |
| Total | | | 800 |

Tabla 7.4: Presupuesto parcial de la tarea de diseño de control del dron.

| Descripción | Horas Dedicadas | Coste (€/h) | Importe € |
|-------------------------|-----------------|-------------|-----------|
| <i>Ingeniero/Alumno</i> | 30 | 20 | 600 |
| <i>Piloto de drones</i> | 16 | 150 | 2400 |
| Total | | | 3000 |

Tabla 7.5: Presupuesto parcial de la tarea del estudio viabilidad comercial y el análisis de vuelo del dron.

Material

Fungible

Se desglosa el material consumido y el que conforma el vehículo en dos grupos según su utilización.

| Descripción | Cantidad | Coste unitario € | Importe € |
|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------|
| <i>Madera de aeromodelismo</i> | 40 x 40 x 0.3 cm | 1.45 | 1.45 |
| <i>Poliuretano</i> | 100 x 100 x 10 cm | 1.55 | 1.55 |
| <i>Gomas elásticas</i> | 20 | 0.01 | 0.20 |
| <i>Separadores de nylon</i> | 8 | 0.07 | 0.56 |
| <i>Tornillos de nylon</i> | 16 | 0.04 | 0.64 |
| <i>Tornillos de acero</i> | 4 | 0.02 | 0.08 |
| <i>Tuercas de acero</i> | 2 | 0.01 | 0.02 |
| <i>Cinta adhesiva</i> | 0.5 m | 0.50 | 0.50 |
| <i>Cola blanca</i> | 75 g | 1.700 | 1.70 |
| <i>Silicona</i> | 50 ml | 0.12 | 0.12 |
| <i>Material bicomponente</i> | 30 ml | 6.50 | 6.50 |
| <i>Bridas</i> | 20 | 0.05 | 1 |
| Total | | | 14.32 |

Tabla 7.6: Presupuesto parcial del material fungible requerido para la estructura.

| Descripción | Modelo | Cantidad | Coste unitario € | Importe € |
|-------------------|-------------------------|----------|------------------|-----------|
| <i>FC</i> | F3 Acro 6 DOF | 1 | 25.46 | 25.46 |
| <i>PDB</i> | Lantian BEC 5V 12V 3A | 1 | 4.33 | 4.33 |
| <i>Motor</i> | Racerstar BR1103 8000KV | 4 | 7.91 | 31.64 |
| <i>ESC</i> | Racerstar RS6A V2 1-2S | 4 | 3.83 | 15.32 |
| <i>Hélice</i> | Racerstar 2030 R-BN55x3 | 20 | 0.09 | 1.8 |
| <i>Batería</i> | ZOP Power 7.4V 850mAh | 3 | 6.49 | 19.47 |
| <i>Receptor</i> | FR Sky XM | 1 | 10.88 | 10.88 |
| <i>Transmisor</i> | FR Sky X9D | 1 | 179.84 | 179.84 |
| <i>Estaño</i> | 2 mm con alma de resina | 50 cm | 0.10 | 0.10 |
| <i>Cableado</i> | alambre de 1 mm aislado | 1 m | 0.10 | 0.10 |
| Total | | | | 288.94 |

Tabla 7.7: Presupuesto parcial del material fungible correspondientes a los componentes electrónicos.

No fungible

A continuación se detalla el material no fungible requerido para la realización de este trabajo.

| Descripción | Horas dedicadas | Amortización (€/h) | Importe € |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------|-----------|
| <i>Máquina de corte por láser</i> | 1 | 15 | 15 |
| <i>Máquina de corte por hilo</i> | 4 | 10 | 40 |
| <i>Banco de pruebas de motor</i> | 2 | 6 | 12 |
| <i>Cargador de baterías LiPo</i> | 15 | 0.50 | 7.50 |
| <i>Soldador</i> | 4 | 0.20 | 0.80 |
| <i>Herramientas</i> | 15 | 0.15 | 2.25 |
| | | Total | 77.55 |

Tabla 7.8: Presupuesto parcial del material no fungible.

Presupuestos Totales

Finalmente se adjunta el presupuesto global del proyecto. Cabe mencionar que se ha incluido en la actividad de fabricación los costes del material fungible y no fungible.

| Descripción | Horas dedicadas | Importe € |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| <i>Estudio inicial</i> | 60 | 1000.40 |
| <i>Diseño y modelado CAD</i> | 285 | 3643.80 |
| <i>Fabricación</i> | 60 | 1399.02 |
| <i>Control</i> | 45 | 800 |
| <i>Análisis de vuelo y comercial</i> | 46 | 3000 |
| | Total | 9843.22 |

Tabla 7.9: Presupuesto total del proyecto.

Asciende el presupuesto total del proyecto a la siguiente cantidad expresada en EUROS:

NUEVE MIL OCHOCIENTOS CUARENTA Y TRES EUROS CON VEINTIDÓS CÉNTIMOS

Bibliografía

- [1] Alex Elliot. *The build your own drone manual*. Marcombo, 2016.
- [2] Paul Correia. *Guía práctica del GPS*. Marcombo, 2011.
- [3] José Pedro Magraner Rullan. *11889_Mecánica de vuelo (I)*. UPV, 2016.
- [4] Prof. Dick K. P. Yue. *Marine Hydrodynamics*. Lecture 12, 2005.
- [5] Xavier Ortiz, David Rival and David Wood. *Forces and Moments on Flat Plates of Small Aspect Ratio with Application to PV Wind Loads and Small Wind Turbine Blades*. Energies, 2015.
- [6] Mtra. Alondra Torres. *Número Reynolds*. Universidad Iberoamericana Ciudad De México, México D.F, 2008.
- [7] Michael S. Selig, James J. Guglielmo, Andy P. Broeren and Philippe Giguere. *Summary of Low-Speed Data*. University of Illinois. SoarTech Publications, 1995.
- [8] Airfoiltools. Consultado en <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n6409-il>.
- [9] Aerodynamics for students. Consultado en <http://s6.aeromech.usyd.edu.au/aerodynamics/index.php/sample-page/subsonic-aerofoil-and-wing-theory/3d-prandtl-lifting-line-theory/>.

APÉNDICE A

Ensayo de motor

Para comprobar la fuerza que ejercen los motores combinado con las hélices se ha realizado una prueba de empuje. Para ello se ha utilizado el *software* libre llamado *RCbenchmark*, el cuál requiere un banco de pruebas homologado.

A continuación se adjuntan fotografías del banco de pruebas:

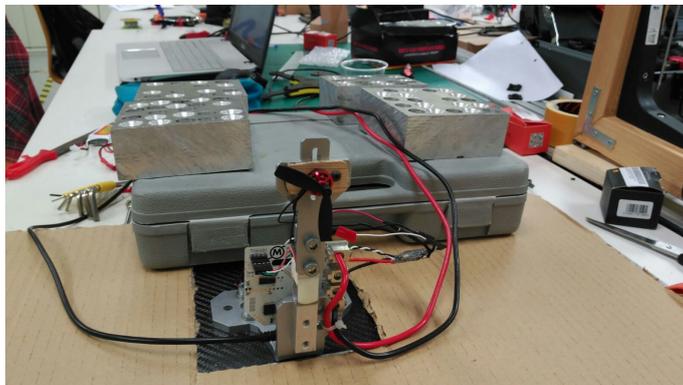


Figura A.1: Banco de pruebas para los motores. (Fuente: Propia)

Se puede apreciar en la imagen que falta una de las palas de la hélice. Las fuertes vibraciones del ensayo provocaron su rotura. Para prever posibles accidentes se improvisó una cubierta de seguridad.



Figura A.2: Banco de pruebas con cubierta de seguridad. (Fuente: Propia)

Se realizó un ensayo de fuerza de empuje exitosamente obteniendo los siguientes resultados:

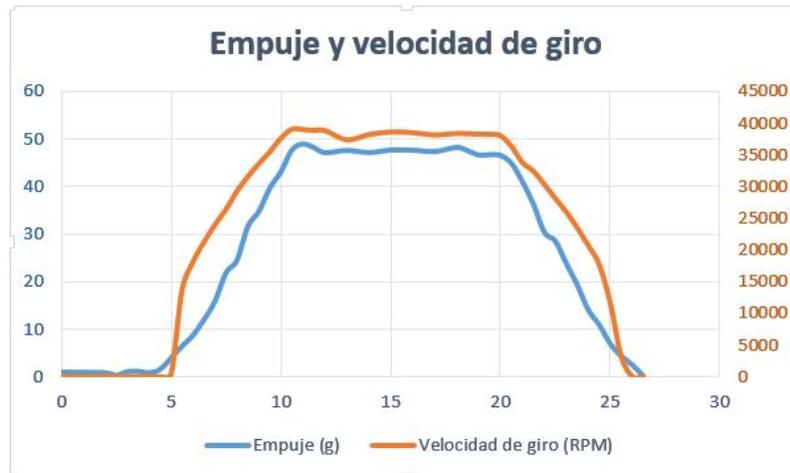


Figura A.3: Fuerza de empuje velocidad de giro de las hélices obtenidas del ensayo. (Fuente: Propia)



Figura A.4: Fuerza de empuje y eficiencia obtenidas del ensayo. (Fuente: Propia)

La siguiente tabla recoge los datos de eficiencia y velocidad de giro correspondientes al empuje máximo.

| Parámetro | Valor |
|--------------------------|-------------|
| <i>Empuje</i> | 48.24 (g) |
| <i>Eficiencia</i> | 1.62 |
| <i>Velocidad de giro</i> | 38438 r.p.m |

Tabla A.1: Parámetros obtenidos del ensayo.

APÉNDICE B

Bocetos y modelos previos

A continuación se muestran bocetos previos realizados:

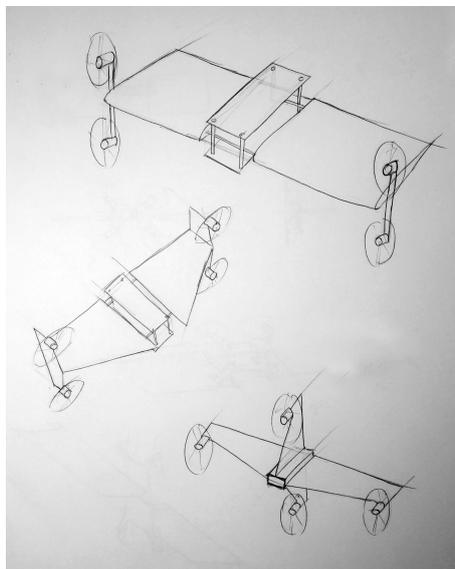


Figura B.1: Bocetos previos de posibles diseños de dron. (Fuente: Propia)

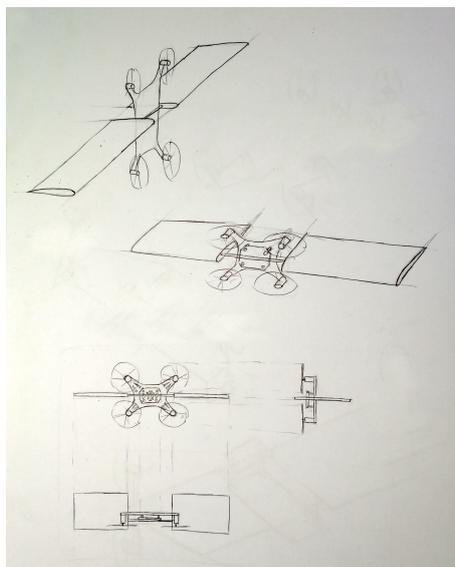


Figura B.2: Bocetos previos de posibles diseños de dron. (Fuente: Propia)

También se añaden fotografías de modelos de dron deshechados:



Figura B.3: Modelo de dron desechado por peso excesivo. (Fuente: Propia)



Figura B.4: Diseño del modelo de dron previo al definitivo. (Fuente: Propia)

APÉNDICE C

Galería de fotos

Por último, se incluyen diferentes fotografías tomadas durante las diferentes etapas de desarrollo de este proyecto.

