



**Universidad
Europea** MADRID

**ESCUELA DE ARQUITECTURA,
INGENIERÍA Y DISEÑO**

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

**Diseño y Fabricación de un
Multicóptero mediante Impresión 3D**

**David Rodríguez Díaz
Curso 2022-2023**

Título: Diseño y Fabricación de un Multicóptero mediante Impresión 3D.

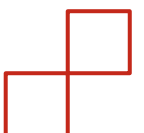
Autor: David Rodríguez Díaz.

Tutor: Martín Caeiro Salgado.

Titulación: Máster en Ingeniería Aeronáutica.

Curso: 2022-2023.

Descripción: Diseño y fabricación de un multicóptero con una masa inferior a 250g utilizando métodos CAD y fabricación aditiva mediante FDM.



Resumen/Abstract

En el siguiente proyecto se han combinado varias disciplinas de la Ingeniería Aeronáutica para diseñar un multicóptero cuya estructura puede fabricarse mediante impresión FDM en un entorno doméstico. Se han utilizado componentes estándar de fácil acceso.

Las disciplinas más importantes antes comentadas son: diseño de aeronaves, diseño de estructuras, integración de sistemas e impresión FDM.

El aligerado de la estructura, la elección de los componentes y el montaje final han sido las tareas que más esfuerzo han requerido por parte del estudiante.

También ha sido necesario realizar varios ciclos de prueba y error tanto en los cálculos asistidos por ordenador como en el momento de fabricar las piezas que componen la estructura, hasta llegar a una solución óptima.

Finalmente se plantea un plan de ensayos de vuelo del que se han hecho efectivos los primeros pasos, volando el dron en un entorno controlado y sin viento.

Como conclusión podemos decir que el abarcar tantas fases de desarrollo de una aeronave en un mismo proyecto comporta una carga de trabajo considerable.

Palabras clave: multicóptero, FDM, diseño, CAD, integración, esfuerzos.

This Project combines several disciplines of the Aeronautical Engineering to design a multicopter with a structure that can be manufactured with FDM techniques at a domestic environment. The equipment used is commonly used.

The most important disciplines are aircraft design, structure design, systems' integration and FDM manufacturing.

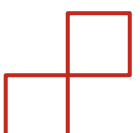
The most challenging tasks for the student were: lighten up the structure, choosing the components and final assembly.

To reach the optimal solution, it was also necessary to complete several try-and-error loops both in the stress computer simulations and when manufacturing the parts to form the structure at home.

At the end we propose a flight test campaign and evidence are shown that the first phases of this campaign have been completed.

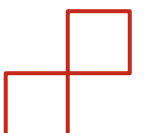
As conclusion, we can say that the high workload of this project has been caused by the fact that a lot of different phases of development of an aircraft have been covered.

Key words: multicopter, FDM, design, CAD, integration, stress.



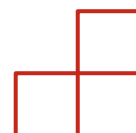
Agradecimientos:

A mi incansable compañera de vida,
por sus infinitos apoyo, comprensión y paciencia
y por creer en mí cuando más lo necesité.

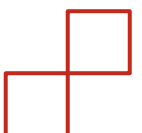


Índice de Contenidos

| | |
|--|----|
| Resumen/Abstract | 4 |
| Lista de Acrónimos | 10 |
| 1. Introducción..... | 11 |
| 1.1 Problema Propuesto | 11 |
| 1.2 Objetivos | 11 |
| 1.3 Antecedentes | 12 |
| 1.4 Contexto..... | 12 |
| 1.4.1 Normativa..... | 13 |
| 1.5 Metodología | 13 |
| 2. Diseño de la Aeronave..... | 14 |
| 2.1 Introducción..... | 14 |
| 2.2 Requisitos | 15 |
| 2.3 Estudio de Soluciones Similares Existentes..... | 16 |
| 2.3.1 Batería..... | 16 |
| 2.3.2 Hélices | 18 |
| 2.3.3 Motores..... | 21 |
| 2.4 Definición de Componentes..... | 21 |
| 2.4.1 Equipo de Radiocontrol | 21 |
| 2.4.1.1 Adaptación Emisora: Throttle Springback..... | 22 |
| 2.4.1.2 Requisitos | 23 |
| 2.4.2 Controlador de Vuelo | 24 |
| 2.4.2.1 Requisitos | 25 |
| 2.4.3 Motores..... | 25 |
| 2.4.3.1 Requisitos | 26 |
| 2.4.4 Hélices | 27 |
| 2.4.4.1 Requisitos | 27 |
| 2.4.4.2 Ensayos de Hélice - Primera Opción..... | 28 |
| 2.4.4.3 Segunda opción..... | 29 |
| 2.4.4.4 Ensayos de Hélice - Segunda Opción..... | 30 |
| 2.4.4.5 Ensayos de Hélice - Conclusiones | 31 |
| 2.4.5 ESCs | 31 |
| 2.4.5.1 BEC..... | 32 |
| 2.4.5.2 Requisitos | 32 |
| 2.4.6 Placa Distribuidora | 33 |
| 2.4.7 Batería..... | 33 |
| 2.4.8 Conectores y Cableado | 34 |
| 2.4.9 Masa Final Equipos | 34 |

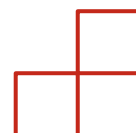


| | | |
|--------|--|----|
| 2.4.10 | Cargador de Baterías | 35 |
| 2.5 | Prototipo | 35 |
| 3. | Diseño de la Estructura | 39 |
| 3.1 | Requisitos de la estructura | 39 |
| 3.2 | Propiedades del material | 39 |
| 3.2.1 | Anisotropía | 40 |
| 3.3 | Software de Trabajo | 41 |
| 3.4 | Proceso de Diseño | 42 |
| 3.5 | Volúmenes de Componentes | 42 |
| 3.6 | Ubicación de la Carga de Pago..... | 43 |
| 3.7 | Posición de los Motores | 44 |
| 3.8 | Envolvente para Optimización Topológica | 44 |
| 3.9 | Definición de la Estructura | 46 |
| 3.10 | Reducción de Masa | 47 |
| 3.11 | Generación de la Malla | 48 |
| 3.12 | Cálculo de Esfuerzos | 50 |
| 3.13 | Cambio en el diseño tras la Primera Impresión | 52 |
| 4. | Fabricación de la Estructura | 53 |
| 4.1 | Descripción y Especificaciones de la Impresora Utilizada | 53 |
| 4.2 | Software de Trabajo | 53 |
| 4.3 | Generación del gCode..... | 54 |
| 4.4 | Secado del Filamento | 55 |
| 4.5 | Ajuste de la Impresora | 55 |
| 4.6 | Impresión..... | 56 |
| 5. | Montaje de la Aeronave..... | 59 |
| 5.1 | Montaje..... | 59 |
| 5.2 | Configuración del Controlador de Vuelo..... | 63 |
| 5.2.1 | Software de Trabajo | 63 |
| 6. | Plan de ensayos | 67 |
| 6.1 | Resultados | 67 |
| 7. | Conclusiones | 70 |
| 8. | Desarrollo Futuro..... | 71 |
| 9. | Presupuesto | 72 |
| 10. | Bibliografía | 73 |
| | Anexo A..... | 74 |
| | Anexo B..... | 75 |
| | Anexo C..... | 75 |



Índice de Ilustraciones

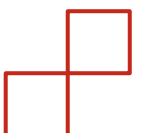
| | |
|--|----|
| Ilustración 1 - Esquema de conexiones de equipos eléctricos y electrónicos..... | 15 |
| Ilustración 2 - DJI Mini 2 SE..... | 16 |
| Ilustración 3 - DJI Mini 3..... | 17 |
| Ilustración 4 - Eachine EX5..... | 17 |
| Ilustración 5 - Hubsan Zino Mini SE..... | 18 |
| Ilustración 6 - DJI FPV..... | 19 |
| Ilustración 7 - Mayfly V2.0..... | 19 |
| Ilustración 8 - Flywoo Explorer LR..... | 20 |
| Ilustración 9 - GEPRC Crocodile Baby..... | 20 |
| Ilustración 10 - iFlight Chimera 4 LR..... | 21 |
| Ilustración 11 - Emisora y receptor seleccionados..... | 22 |
| Ilustración 12 - Mecanismo de spring-back para auto centrado del throttle..... | 23 |
| Ilustración 13 - Controlador de vuelo..... | 25 |
| Ilustración 14 - Motores seleccionados..... | 26 |
| Ilustración 15 - Hélices seleccionadas..... | 27 |
| Ilustración 16 - Diseño del soporte para ensayos de hélice..... | 28 |
| Ilustración 17 - Soporte impreso aún con las ayudas para la impresión..... | 28 |
| Ilustración 18 - Setup para ensayo..... | 29 |
| Ilustración 19 - Medidas de tracción y consumo eléctrico..... | 29 |
| Ilustración 20 - Segunda opción de hélices..... | 30 |
| Ilustración 21 - Setup segunda hélice..... | 30 |
| Ilustración 22 - Segundo ensayo..... | 31 |
| Ilustración 23 - Variador seleccionado..... | 32 |
| Ilustración 24 - Ejemplo de placa distribuidora..... | 33 |
| Ilustración 25 - Batería seleccionada..... | 34 |
| Ilustración 26 - Cargador de baterías..... | 35 |
| Ilustración 27 - Asimetría en el atornillado de los motores..... | 36 |
| Ilustración 28 - Vista inferior del prototipo..... | 37 |
| Ilustración 29 - Vista superior del prototipo..... | 38 |
| Ilustración 30 - Volúmenes de los componentes del núcleo de la estructura y trayectorias de instalación..... | 42 |
| Ilustración 31 - Ubicación de la carga de pago..... | 43 |
| Ilustración 32 - Envoltente de la estructura del cuerpo central..... | 43 |
| Ilustración 33 - Envoltentes del cuerpo principal y de los soportes de los motores..... | 44 |
| Ilustración 34 - Envoltente completa..... | 45 |
| Ilustración 35 - Optimización topológica..... | 45 |
| Ilustración 36 - Envoltentes para brazos..... | 46 |
| Ilustración 37 - Superposición con los resultados de la optimización topológica..... | 46 |
| Ilustración 38 - Ejemplo de aligeramiento y creación de tirantes..... | 47 |
| Ilustración 39 - Ejemplo de aligerado de partes más pequeñas..... | 48 |
| Ilustración 40 - Detalle del mallado..... | 48 |
| Ilustración 41 - Mallado final..... | 49 |
| Ilustración 42 - Análisis ascenso brusco..... | 50 |
| Ilustración 43 - Análisis golpe vertical..... | 51 |
| Ilustración 44 - Análisis golpe lateral..... | 51 |
| Ilustración 45 - Impresora Anycubic i3 Mega S..... | 53 |
| Ilustración 46 - Vista inferior de la primera impresión realizada..... | 54 |
| Ilustración 47 - Secado de filamento al horno..... | 55 |



| | |
|---|----|
| Ilustración 48 - Primeras capas de los componentes de la mitad inferior del multicóptero..... | 56 |
| Ilustración 49 - Primeras capas de la parte superior del multicóptero..... | 57 |
| Ilustración 50 - Primer intento de impresión. | 57 |
| Ilustración 51 - Resultado del primer intento de impresión. | 58 |
| Ilustración 52 - Detalle de los soportes imposibles de retirar. | 58 |
| Ilustración 53 - Estructura completa (I). | 59 |
| Ilustración 54 - Estructura completa (II). | 59 |
| Ilustración 55 - Estructura completa (III). | 60 |
| Ilustración 56 - Peso de la estructura completa. | 60 |
| Ilustración 57 - Multicóptero completo (I). | 61 |
| Ilustración 58 - Multicóptero completo (II). | 61 |
| Ilustración 59 - Multicóptero..... | 62 |
| Ilustración 60 - Herramienta de configuración del controlador de vuelo (I). | 63 |
| Ilustración 61 - Herramienta de configuración del controlador de vuelo (II). | 64 |
| Ilustración 62 - Herramienta de configuración del controlador de vuelo (III). | 65 |
| Ilustración 63 - Herramienta de configuración del controlador de vuelo (IV). | 65 |
| Ilustración 64 - Multicóptero en vuelo (I). | 68 |
| Ilustración 65 - Multicóptero en vuelo (II). | 68 |
| Ilustración 66 - Multicóptero en vuelo (III). | 69 |

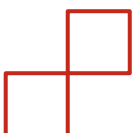
Índice de Tablas

| | |
|----------------------------------|----|
| Tabla 1 - Estudio de masas. | 34 |
| Tabla 2 - Presupuesto..... | 72 |



Lista de Acrónimos

| Término | Significado |
|---------|----------------------------------|
| BEC | Battery Eliminating Circuit |
| BMS | Battery Management System |
| ESC | Electronic Speed Controller |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| FPV | First Person View |
| MTOM | Maximum Take-off Mass |
| RBE | Requirement Based Engineering |
| RPAS | Remotely Piloted Aircraft System |
| RTF | Ready To Flight |
| TL | Top Level |



1. Introducción

El objetivo principal de este trabajo final de máster consiste en diseñar una estructura ligera y funcional que una todos los componentes de un multicóptero, asegurando una masa máxima en el despegue menor de 250 gramos.

De manera indirecta, dicho objetivo implicará llevar a cabo las siguientes tareas:

- Elección de componentes estudiando la compatibilidad entre ellos.
- Prototipado del RPAS.
- Optimizado del diseño.
- Cálculo de elementos finitos del diseño.
- Impresión en 3D del diseño final.
- Vuelo de prueba.

Para lograr el objetivo se trabajarán las siguientes disciplinas:

- Diseño de aeronaves.
- Diseño de estructuras.
- Integración de sistemas.
- Ensayo de componentes.
- Diseño asistido por ordenador.
- Simulaciones de esfuerzos.
- Impresión FDM.
- Manejo de aeromodelos.

1.1 Problema Propuesto

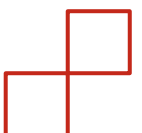
El principal reto del presente proyecto consiste en diseñar una estructura portante que mantenga unidos físicamente todos los componentes necesarios para el correcto funcionamiento del RPAS, sea capaz de resistir las cargas esperadas durante la operación durante toda la vida útil del producto y mantenga la masa total del aparato por debajo de los 250 gramos.

Para lograr tal objetivo será necesario investigar soluciones existentes, elegir cada uno de los componentes necesarios, integrarlos en la solución final, y diseñar, fabricar y probar la estructura.

1.2 Objetivos

Los objetivos del proyecto son los siguientes:

- Masa total inferior a 250g.
- Establecer los requisitos para comenzar el diseño.
- Estudiar diferentes propuestas y seleccionar la solución óptima.
- Estudiar la viabilidad para la fabricación de los distintos componentes y su orientación de impresión.
- Configurar la impresión y el ensamblaje de las distintas piezas.
- Grabación de una prueba de vuelo.



1.3 Antecedentes

No pasará inadvertido para el atento observador el éxito que últimamente han tenido en el mundo del radiocontrol las aeronaves de tipo multicóptero, más conocidas como drones. Años atrás el aeromodelismo estaba lleno todo tipo de réplicas y diseños ad-hoc, pero siempre del tipo ala fija y motores de combustión.

Más adelante, comenzaron a hacerse sitio los helicópteros (también de combustión), gracias al avance de la electrónica y la incorporación de giróscopos ya que sin estos era de extrema dificultad controlar este tipo de aparatos sin estar subido a bordo, experimentando las aceleraciones y anticipando los movimientos del aparato.

Ambas formas de aeromodelismo requerían de tecnologías no masificadas aún, de difícil disponibilidad y alto precio: hélices y motores de combustión en miniatura, equipos de radio AM y FM de alcance limitado y pocos canales, planos que sólo podían conseguirse en tiendas físicas y previo pago. Todo esto unido a la ausencia de simuladores (programas de ordenador en los que se puede manejar un modelo virtual con la radio para aumentar la destreza) hacía del aeromodelismo una afición cara, difícil y arriesgada.

1.4 Contexto

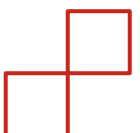
El aumento desmesurado del mercado de drones ha venido de la mano de importantes avances tecnológicos. El primero de ellos la mejora en la densidad energética de las baterías: la mayor accesibilidad a tecnologías de ion-litio o litio-polímero ha sido determinante ya que se trata de aparatos de alto consumo y en los que los motores de combustión son prácticamente inviables por la necesidad de respuesta tan rápida que tienen.

El segundo factor ha sido la mejora en la electrónica de control de vuelo, capaz de lograr un vuelo estabilizado en las peores condiciones meteorológicas gracias a la combinación de giróscopos, acelerómetros, una importante capacidad de cálculo, y un software con lógicas de control customizadas para el aparato y de gran exactitud.

El tercer hecho importante es el desarrollo de la planta de potencia. En cuanto a los motores: la aparición de los motores sin escobillas o brushless, los cuales mejoran en durabilidad y eficiencia a los motores con escobillas tradicionales, reduciendo además el peso. En cuanto a la electrónica de control (variadores o ESC's): en cuanto a la mejora de los circuitos integrados con menor disipación térmica y mayor precisión en la regulación del voltaje de salida.

Con todo lo anterior, se ha dado también la coincidencia del desarrollo y abaratamiento de las tecnologías necesarias con un increíble aumento en la facilidad de acceso de manera minorista a proveedores de otros continentes. Plataformas como Aliexpress o Banggood ofrecen equipos y componentes que antes sólo se encontraban en tiendas especializadas (al principio en sólo físicas y posteriormente también online) a precios muy inferiores.

En paralelo a lo ocurrido en otros sectores tecnológicos como la telefonía móvil o los electrodomésticos, ciertas marcas de origen chino comenzaron a hacerse un



nombre salvando el estereotipo de baja calidad, como DJI, con productos muy competitivos a precios accesibles.

1.4.1 Normativa

Dicho desarrollo acelerado ha requerido la intervención de manera casi extraordinaria por parte de la autoridad competente para la regulación y control de la operación de los multicópteros.

La Unión Europea se vio obligada a legislar prácticamente de urgencia tras los hechos que estaban ocurriendo tanto en nuestro continente como en el resto del planeta. Drones manejados por aficionados empezaban a provocar accidentes e incidentes en aeropuertos, eventos deportivos y sociales, reuniones familiares y otros escenarios.

El principal aspecto de la normativa es que obliga a registrarse a todos los operadores que, dentro de la categoría abierta, utilicen drones de más de 250g de masa máxima en el despegue y que en caso de colisión pueda transmitir más de 80 julios a un ser humano (Anexo A). De ahí el requisito de masa del presente proyecto.

Como complemento a la información anterior, es de destacar que también es obligatorio el registro si se manejan drones (en categoría abierta) con sensores capaces de capturar datos personales (cámara, por ejemplo), y en todos los casos para la categoría específica.

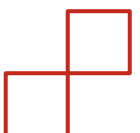
1.5 Metodología

El presente proyecto comenzará sus andaduras técnicas tomando decisiones de a nivel aeronave, y para ello, y siguiendo las directrices de la asignatura “Diseño Avanzado de Aeronaves” del máster al que pertenece este trabajo, se evaluarán productos existentes de características similares, estableciendo una base sólida para la definición de los parámetros de alto nivel.

Posteriormente se definirán los componentes a utilizar con el objetivo de tener definidos todos los requisitos necesarios en el momento de comenzar el diseño de la estructura del RPAS (dimensiones y pesos de los equipos, cargas a exigir, etc.)

A continuación, se realizará el diseño como tal de la estructura, utilizando herramientas de optimización topológica al principio, pero refinando la solución posteriormente en Catia.

Finalmente, y siguiendo las directrices del proyecto, se planteará una campaña de vuelos de prueba.



2. Diseño de la Aeronave

En esta fase del proyecto seguiremos la filosofía de diseño “Top to Down”, comenzando con el diseño de alto nivel, que en este caso corresponde a la aeronave completa, y desde ahí bajando de nivel hasta llegar a los equipos y sus interfaces tanto físicas como funcionales.

2.1 Introducción

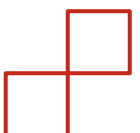
Para dar una descripción general del producto final que sirva para sentar las bases de diseño, podemos seguir el camino entre el input principal y el producto final.

Comenzaríamos por la interfaz humana con la que se controla el RPAS, la emisora de radiocontrol, ella transmite sus órdenes mediante ondas electromagnéticas al receptor que se encuentra en la aeronave y las traduce en impulsos eléctricos.

Este receptor se alimenta con una batería que será única y por tanto hará de fuente de potencia de todos los elementos del RPAS. La información recibida por el receptor es transferida al controlador de vuelo mediante un bus de datos, y éste último interpreta las solicitudes del operador y las traduce en cambios en las velocidades de giro de los cuatro motores.

Los motores podrían estar alimentados directamente por el controlador de vuelo, pero esto requeriría cables más gruesos y pesados y una placa electrónica del controlador más grande y difícil de integrar. Para resolver esto, se utilizan los módulos ESC: circuitos de que reciben una señal de control y mediante transistores de efecto campo y otros circuitos integrados permiten la transferencia de potencia entre la batería y los motores de manera controlada. En nuestro caso además es necesario convertir la corriente continua de la batería en corriente alterna de tres hilos para los motores sin escobillas.

Finalmente, el motor provee de par y velocidad angular a las hélices, cuyo tamaño también es decisivo en el diseño global. Con el objetivo de masa máxima como principal restricción, debemos intentar que el RPAS sea lo más pequeño posible, pero dejando espacio para que las turbulencias que generan las hélices en su entorno interfieran lo menos posible unas con otras.



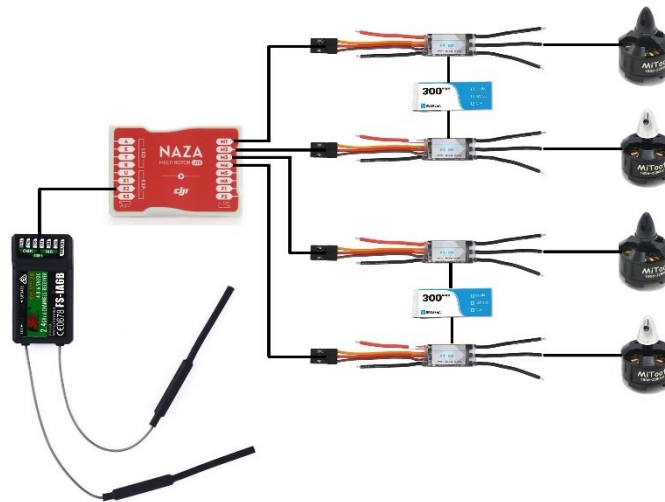


Ilustración 1 - Esquema de conexiones de equipos eléctricos y electrónicos.

2.2 Requisitos

RPAS_TL_001: MTOM inferior a 250g.

- Objetivo: mantenerse bajo el límite legal para necesitar licencia de operador.
- Nota: condición necesaria según propuestas de proyectos UEM.
- Sistemas afectados: todos.

RPAS_TL_002: La estructura debe poder imprimirse mediante FDM.

- Objetivo: Facilidad de acceso para el aeromodelista aficionado.
- Nota: condición requerida según listado de propuestas de proyectos UEM.
- Sistemas afectados: estructura.

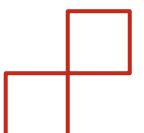
RPAS_TL_003: La relación potencia/peso debe ser superior a 2.

- Objetivo: asegurar la capacidad de vuelo y un mínimo de maniobrabilidad.
- Nota: requisito basado en datos empíricos, véase [Ref.1].
- Sistemas afectados: motor y hélice.

RPAS_TL_004: El peso de la carga de pago debe ser el máximo posible.

- Objetivo: dar funcionalidad al diseño y otorgar una aplicación práctica al multicóptero.

Como se puede apreciar, no se han definido requisitos de autonomía ni alcance mínimos. Este aspecto será el que deje margen al diseño y permitirá poder cumplir el requisito principal de peso, ya que la imposición de autonomía o alcance mínimos impacta directamente sobre el tamaño de la batería y esto sobre la MTOM. En cualquier caso, es relativamente sencillo el disponer de un juego de baterías e intercambiar estas según se vayan agotando.



2.3 Estudio de Soluciones Similares Existentes

Para el dimensionado de los componentes que se instalarán of-the-shelf, y que impactan directamente en la definición del diseño de conjunto, es de gran ayuda el análisis de otros productos existentes ya en el mercado y que hayan demostrado buena capacidad tanto de vuelo como de control.

Las dimensiones y pesos de los receptores, variadores y controladores de vuelo se encuentran bastante igualados entre los productos encontrados en el mercado. Por otro lado, sus características técnicas no son conocidas en drones comerciales RTF ya que estos tres componentes suelen integrarse en una sola placa electrónica, y por eso no serán estudiados en esta sección.

La mayor dificultad en la elección y el dimensionado de componentes se ha dado en los motores, hélices y batería, los cuales están intrínsecamente relacionados entre ellos. Para los motores ha sido imposible encontrar especificaciones de modelos comerciales, y se ha recurrido al estudio de proyectos DIY existentes, algunos incluidos en el apartado de hélices para mayor variedad.

En este capítulo se listan simplemente las especificaciones de los equipos estudiados y una conclusión preliminar. La elección final de cada equipo se realiza en el capítulo 2.4.

2.3.1 Batería

DJI Mini 2 SE (249g)

Capacidad: 2250mAh
Peso: 82.5g
Voltaje nominal: 7.7V
Tipo: Li-ion
Energía: 17.32Wh



Ilustración 2 - DJI Mini 2 SE.



DJI Mini 3 (248g)

Capacidad: 2453mAh
Peso: 80.5g



Ilustración 3 - DJI Mini 3.

Eachine EX5 (229g)

Capacidad: 2200mAh
Voltaje nominal: 7.4V
Peso: 80.5g



Ilustración 4 - Eachine EX5.

Hubsan Zino Mini SE (249g)

Capacidad: 2400mAh
Voltaje nominal: 7.2V
Peso: 102g
Tipo: LiPo
Capacidad de descarga: 8C

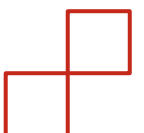




Ilustración 5 - Hubsan Zino Mini SE.

Vemos que, salvando pequeñas diferencias, la tendencia es a usar tecnologías de litio con dos células en serie y capacidades de 2200mAh por debajo de los 100g de masa.

2.3.2 Hélices

DJI Mini 2 SE (249g)

Diámetro y paso: 4.7 x 2.6 pulgadas.
Peso: 0.6g cada una.
Nº palas: 2.

DJI Mini 3 (248g)

Diámetro y paso: 6.0 x 3.0 pulgadas.
Peso: 0.9g cada una.
Nº palas: 2.

DJI FPV:

Diámetro y paso: 5.3 x 2.8 pulgadas.
Nº palas: 3.

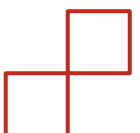




Ilustración 6 - DJI FPV.

Mayfly V2.0 (<250g)

Diámetro y paso: 4.0 x 2.4 pulgadas.
Nº palas: 2.



Ilustración 7 - Mayfly V2.0.

Flywoo Explorer LR (145g)

Diámetro y paso: 4.0 x 2.4 pulgadas.
Nº palas: 2.

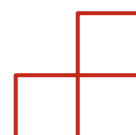




Ilustración 8 - Flywoo Explorer LR.

GEPRC Crocodile Baby (143g)

Diámetro y paso: 4.0 x 4.2 pulgadas.
Nº palas: 2.



Ilustración 9 - GEPRC Crocodile Baby.

iFlight Chimera 4 LR (266g)

Diámetro y paso: 4.0 x 3.0 pulgadas.
Nº palas: 3

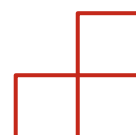




Ilustración 10 - iFlight Chimera 4 LR.

La tendencia es a utilizar diámetros de 4 a 5 pulgadas y pasos de 2 a 3 pulgadas, la gran mayoría con 2 palas.

2.3.3 Motores

Mayfly V2.0 (<250g): 1404 3800KV

Flywoo Explorer LR (145g): 1404 2750KV

GEPRC Crocodile Baby (143g): 1404 2750KV

iFlight Chimera 4 LR (266g): 1404 3800KV

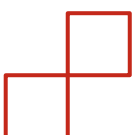
Hay una clara inclinación por el 1404 aunque varía la relación rpm/voltaje.

2.4 Definición de Componentes

En este apartado recorreremos uno por uno los equipos elegidos para nuestro RPAS, tarea realizada valorando los aspectos positivos y negativos de cada uno, teniendo en cuenta la compatibilidad entre ellos y los datos obtenidos en el capítulo anterior.

2.4.1 Equipo de Radiocontrol

El equipo de radiocontrol es aquel que nos permite enviar comunicarnos con el RPAS a través del aire para controlarlo. La tecnología en cuanto a los componentes principales ha cambiado poco: se necesita una emisora y un receptor. La emisora es el equipo que permanece en las manos del operador y cuenta típicamente con dos sticks principales que se mueven en 4 ejes, y una serie de switches y knobs secundarios para manejar otros canales que requiera el modelo a controlar. En los últimos años ha evolucionado notablemente el estándar en cuanto a las ondas de radio utilizada: antes se utilizaban ondas de radio FM o AM con cristales de cuarzo para elegir la frecuencia, mientras que en la actualidad se utiliza la banda de los



2.4GHz con vínculos emisora/receptor basados en intercambios de código de varias veces por segundo, lo que elimina la necesidad de los cristales y aporta una comunicación más robusta y resistente a interferencias. Esta tecnología también permite la comunicación bidireccional, pudiendo saber en la emisora el voltaje de la batería del receptor, o incluso otros parámetros de telemetría como altitud, velocidad, rpms de motor, etc.

Para este proyecto se ha buscado un equipo fiable y de conocida reputación, mientras que se mantiene un precio accesible para la gran mayoría: emisora Flysky FS-I6X con receptor FS-IA6B.

Flysky produce un amplio abanico de equipos de todas las calidades y precios, y está haciéndose sitio entre marcas tradicionales más conocidas como Futaba, Sanwa o Multiplex. La FS-I6X consta de 6 canales ampliables a 10, un alcance teórico sin obstáculos de 1500m y un sistema propio de vinculación con el receptor. Por otro lado, el receptor FS-IA6B puede recibir hasta 6 canales, y posee conector para telemetría y comunicación mediante protocolos i-Bus (propio de la marca) y s-Bus (perteneciente a Futaba) que será el que utilizaremos en este proyecto para comunicarse con el controlador de vuelo (necesitando un cable entre ambos equipos en lugar de cuatro y mejorando la velocidad de comunicación).

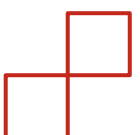


Ilustración 11 - Emisora y receptor seleccionados.

2.4.1.1 Adaptación Emisora: Throttle Springback

Cabe destacar que ha sido necesario modificar la emisora para el vuelo con dron asistido por giróscopos y acelerómetros.

Por defecto y en general las emisoras que se utilizan para radiocontrol de aeronaves vienen equipadas con un control del gas o throttle, ubicado en el eje vertical del stick izquierdo, que mantiene la posición; es decir, no vuelve al centro



cuando se libera. Esto se debe a que es la configuración más utilizada para el manejo de aeronaves de ala fija, drones de competición, y helicópteros sin asistencia electrónica.

La situación cambia cuando se pilotan helicópteros o drones de vuelo asistido por giróscopos y acelerómetros. En estos aparatos se busca que la ayuda electrónica limite los ángulos de alabeo y estabilice el aparato en vuelo a punto fijo cuando se liberan todos los controles y no hay inputs. Para que esto sea posible, los controles deben volver automáticamente a su posición central al soltarlos.

Dado que el vuelo a realizar con el RPAS objeto del presente proyecto no es para competición, se ha elegido un controlador de vuelo del tipo estabilizador, como se verá más adelante, y por ello se ha tenido también que modificar la emisora adquirida para añadirle el mecanismo de auto centrado al eje vertical del stick izquierdo.



Ilustración 12 - Mecanismo de spring-back para auto centrado del throttle.

La operación es relativamente sencilla y sólo requiere de un poco de maña y algunas herramientas de uso común. Hay que abrir la emisora, retirar el sistema de freno del eje en cuestión, y montar las piezas que se muestran en la ilustración para que el muelle se tense cada vez que se aleja la palanca del centro, y esta vuelva a su posición central cuando se libera.

2.4.1.2 Requisitos

RPAS_RC_001: El equipo debe garantizar un alcance de la señal de 1000m sin obstáculos.

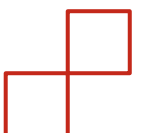
- Objetivo: no perder la comunicación con el RPAS.
- Nota: al no tratarse de un RPAS para FPV ni con piloto automático, se volará siempre con contacto visual.

RPAS_RC_002: La temperatura de los equipos en contacto con la estructura no puede superar los 45°C.

- Objetivo: evitar la pérdida de propiedades en el material estructural.
- Nota: la temperatura de deformación del PLA es de 55°C.

RPAS_RC_003: El receptor debe poder comunicarse con el controlador de vuelo.

- Objetivo: controlar el vuelo del RPAS.



- Nota: hay diferentes estándares y formas de comunicación entre ambos equipos en el mercado.

RPAS_RC_004: El receptor debe pesar lo menos posible.

- Objetivos: reducir peso total, dejar margen para carga de pago.

2.4.2 Controlador de Vuelo

El siguiente componente podemos decir que es el más importante ya que será el cerebro del aparato en cuanto a funciones se refiere. Es el encargado de interpretar las entradas emitidas por el operador y convertirlas en los cambios de actitud y throttle necesarios. También consta de los acelerómetros y giróscopos para mantener el control de vuelo en caso de desestabilización por viento u otros agentes externos.

Tras sopesar las diferentes opciones del mercado, se observó que la gran mayoría de soluciones existentes son para un montaje que requiere de ciertas aptitudes técnicas, ya que es necesaria la micro-soldadura con estaño y el armado de conectores.

También predominan los que utilizan software libre, algo bastante apreciable pero que para el operador principiante puede volverse tedioso y demasiado complejo de configurar.

Buscando un equipo más “plug&play” pero de precio todavía contenido, encontramos el Naza M Lite, fabricado por la ya famosa marca de drones DJI, y enfocado a proyectos de montaje de drones por piezas, pero sin un expertise exagerado.

Este controlador consta de las suficientes entradas y salidas como para gobernar drones de hasta 6 rotores, con dos canales más para un gimbal o rótula de dos ejes que maneje un sensor o cámara exterior, y posibilidad de conexión a antena GPS para vuelo con retorno a casa en caso de pérdida de señal. Es importante recalcar que reconoce el protocolo s-bus de Futaba, que puede ser activado en el receptor elegido para este proyecto, aspecto necesario para la correcta comunicación entre ambos.

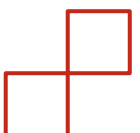




Ilustración 13 - Controlador de vuelo.

2.4.2.1 Requisitos

RPAS_FC_001: El equipo debe convertir las señales del receptor en vectores de tracción para cada conjunto hélice y motor y enviar señales a los variadores para mantener el RPAS en vuelo.

- Objetivo: hacer volar el dron.

RPAS_FC_002: El equipo debe facilitar el gobierno de la aeronave haciéndolo intuitivo y predecible.

Objetivo: facilitar la tarea de pilotaje.

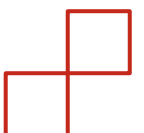
RPAS_FC_003: El controlador debe pesar lo menos posible.

- Objetivos: reducir peso total, dejar margen para carga de pago.

2.4.3 Motores

Siguiendo la tendencia estudiada en el apartado 2.3.3 y también acotada la elección por las opciones del mercado y precios asequibles, para los motores se han elegido cuatro unidades del tipo 1806 y 2280KV.

El parámetro numérico de cuatro cifras, 1806 en nuestro caso, se utiliza como manera estándar de clasificación de motores para modelismo. Hace referencia a las



dimensiones exteriores de la parte de motor que lleve los imanes permanentes (en nuestro caso el rotor (como en la mayoría de los motores sin escobillas para aeromodelismo). Las primeras dos cifras son el diámetro en mm, y las dos siguientes la longitud o altura, también en mm.

El segundo parámetro define la velocidad de giro en vacío, dándonos el número de revoluciones por minuto que girará el motor por cada voltio aplicado en sus terminales, sin carga en el eje.

Con ambos números, se consigue caracterizar el motor de manera no muy efectiva ya que no se dan datos de potencia ni comportamiento bajo carga que faciliten la elección. Para solucionar esto, los fabricantes de motores reputados facilitan unas tablas de compatibilidad motor-hélice en las que según el uso y otros parámetros recomiendan varios tipos de hélice para cada motor. En nuestro caso y al tratarse de un producto low-cost y sin soporte del fabricante, hemos recurrido al estudio de soluciones similares y a ensayos para optimizar la planta de potencia de nuestro diseño.



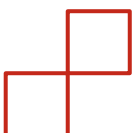
Ilustración 14 - Motores seleccionados.

2.4.3.1 Requisitos

RPAS_MOT_001: Los motores deben transmitir suficiente energía a la hélice.

- Objetivo: que la hélice proporcione la tracción necesaria.

RPAS_MOT_002: Los motores deben pesar lo menos posible.



2.4.4 Hélices

Basándonos en el estudio realizado en el apartado 2.3.2, y buscando un precio y peso contenido, comenzamos la búsqueda del tipo de hélice que mejor se adaptase a nuestro RPAS. Cabe destacar que las opciones disponibles en tiendas online comunes son bastante limitadas, reduciéndose los tipos de hélice encontrados a aquellos que son recambio de otros aparatos vendidos en masa. Por el contrario, en la mayor variedad y especialización de las tiendas de modelismo, encontramos precios mayores y gastos de envío más elevados con plazos de entrega a veces más largos.

Finalmente pudimos encontrar en “Aliexpress” un juego de hélices en principio adecuado para el tamaño y peso de nuestro RPAS a la vez que compatibles con los motores que tendremos en cuenta en el siguiente apartado. Se trata del juego completo en el que dos giran al contrario que las otras dos, con un diámetro de 4.5 pulgadas, un paso de 3 pulgadas y un precio muy competitivo (ver apartado de presupuesto).



Ilustración 15 - Hélices seleccionadas.

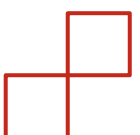
2.4.4.1 Requisitos

RPAS_PROP_001: Generar la tracción necesaria para el vuelo del dron.

- Objetivo: hacer volar el multicóptero.
- Nota: cada hélice debe aportar mínimo 125g de empuje

RPAS_PROP_002: Las hélices deben estar fabricadas para girar dos en sentido opuesto a las otras dos.

- Objetivo: permitir el movimiento de guiñada sin cambios en la altitud de vuelo al acelerar unas y decelerar las contrarias, es decir, utilizando la conservación del momento angular.



2.4.4.2 Ensayos de Hélice - Primera Opción

Será necesario diseñar en Fusion 360, herramienta que describiremos más adelante, un pequeño banco de pruebas. Constará de un soporte que permita instalar el motor con hélice en una báscula que hará las funciones de dinamómetro.

Se utilizará una base plana, aligerada para ahorrar material, que encajará en la base de la balanza. De ella saldrán cuatro pilares inclinados, también huecos, que terminarán en una plataforma cuyas medidas encajan con el motor y lo mantienen totalmente horizontal.

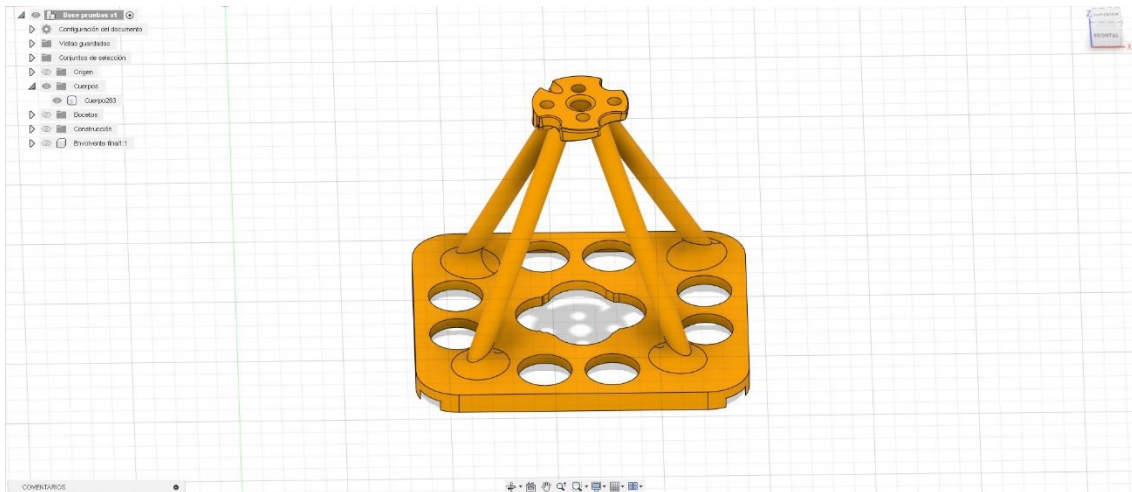
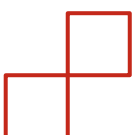


Ilustración 16 - Diseño del soporte para ensayos de hélice.



Ilustración 17 - Soporte impreso aún con las ayudas para la impresión.



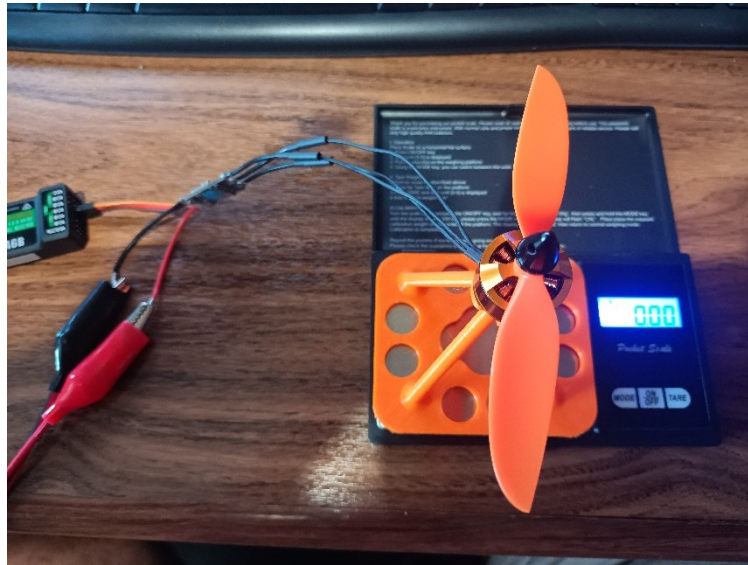


Ilustración 18 - Setup para ensayo.

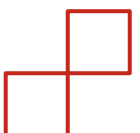


Ilustración 19 - Medidas de tracción y consumo eléctrico.

En báscula una sola hélice probada con motor a toda potencia otorgaba el equivalente a 97g de tracción, lo que da un total de 388g para todo el dron y no cumple el requisito de la ratio peso/potencia por una diferencia considerable (20%).

2.4.4.3 Segunda opción

Tras realizar las pruebas tanto en banco como con el prototipo de madera, llegamos a la conclusión de que la tracción proporcionada por la hélice no cumplía los requisitos pertinentes. Con esto, se buscaron otras opciones en el mercado que pudiesen otorgar más tracción y sacar más partido a los motores ya que con la



primera opción no se aprovechaba su par. Elegimos pues unas hélices tripala del tipo 5045, es decir, 5 pulgadas de diámetro y 4.5 pulgadas de paso.

Como aspectos negativos, tenemos en primer lugar que el peso pasa de 2g a 5g por hélice, lo que nos reduce el margen para la estructura y carga de pago en un total de 13.6g. En segundo lugar, hay que destacar que por el hecho de ser tripala, estas hélices tendrán una menor eficiencia y por lo tanto se reducirá la autonomía total del aparato.



Ilustración 20 - Segunda opción de hélices.

2.4.4.4 Ensayos de Hélice - Segunda Opción

Cambiamos ahora la hélice instalada en el banco por una del segundo tipo, vigilando siempre su correcta orientación para el sentido de giro, y repetimos el ensayo poniendo el motor a máxima potencia con el mismo voltaje.



Ilustración 21 - Setup segunda hélice.

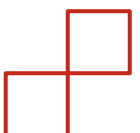




Ilustración 22 - Segundo ensayo.

Vemos que con esta hélice la tracción aumenta hasta 160g, un 78%, lo que nos daría un total de 640g, y una potencia/peso de 2.6. E el aspecto negativo, el consumo es un 235% mayor. Esto reduce la autonomía teórica a menos de la mitad.

2.4.4.5 Ensayos de Hélice - Conclusiones

Con todo lo anterior, debemos tomar la decisión de qué tipo de hélice instalar, o bien considerar que nuestro RPAS tendrá dos posibles configuraciones en función del uso que le vayamos a dar. En uno de ellos su comportamiento será menos reactivo, más lento, pero nos permitirá volar durante más tiempo y con una mayor carga de pago, mientras que con el otro el vuelo será más rápido pero de menor duración y también menor carga de pago.

2.4.5 ESCs

Una vez elegidos los motores, la elección de los variadores no comporta especial dificultad. Basta con atender al tipo de motor, con o sin escobillas, a la corriente máxima necesaria que consumirá este, y al tipo de batería que se utilizará. El protocolo de comunicación con el controlador de vuelo es prácticamente un standard al igual que el conexionado físico.

Para nuestro caso se han seleccionado variadores de la marca Fatjaj, modelo RS-7A, adecuados para motores sin escobillas, baterías LiPo de dos células en serie, y con capacidad BEC para alimentar el receptor y el controlador de vuelo.





Ilustración 23 - Variador seleccionado.

2.4.5.1 BEC

De las siglas de Battery Eliminating Circuit, se trata de una capacidad añadida a los variadores.

En lugar de como tradicionalmente se hacía, instalando un paquete de pilas o baterías exclusivos para alimentar la electrónica del aparato (necesario todavía cuando se utilizan motores de combustión), los variadores incorporan en sus circuitos un regulador de voltaje con el que pueden proveer de 5V de corriente continua y estabilizada a los equipos que lo requieran.

Con esto se logra un importante ahorro en peso, al eliminar una segunda batería, y en complejidad ya que se reduce el cableado y la necesidad de un segundo cargador.

2.4.5.2 Requisitos

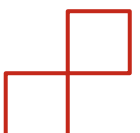
RPAS_ESC_001: Los variadores deben proveer de energía eléctrica suficiente a los motores.

- Objetivo: que los motores reciban la energía necesaria para el vuelo.

RPAS_ESC_002: Los variadores deben pesar lo menos posible.

RPAS_ESC_003: Los variadores deben traducir las señales recibidas desde el controlador de vuelo en energía transmitida a los motores con la suficiente velocidad y proporcionalidad.

- Objetivo: que el vuelo sea estable y controlado.



2.4.6 Placa Distribuidora

Explicaremos brevemente en esta sección en qué consiste este componente dada su extensa utilización en la construcción de multicóptero, pero también con la intención de justificar el hecho de no hacer uso de ella en nuestro diseño.

Se trata de una placa de circuito impreso que sirve para repartir los altos consumos de energía eléctrica desde la batería a los cuatro variadores que alimentan los motores. Como segunda tarea a veces llevan una pequeña fuente de alimentación (conocida como BEC) que provee de 5V estables para alimentar otros componentes del dron como cámaras, receptores o controladores de vuelo.

Partiendo del requisito de limitación de masa y teniendo en cuenta que en un RPAS de pequeño tamaño como el que nos ocupa las potencias a consumir serán contenidas, hemos decidido prescindir de este equipo sustituyéndolo por soldadura de estaño directa entre los 5 cables para cada polo, uno de la batería y cuatro de los variadores de cada motor.

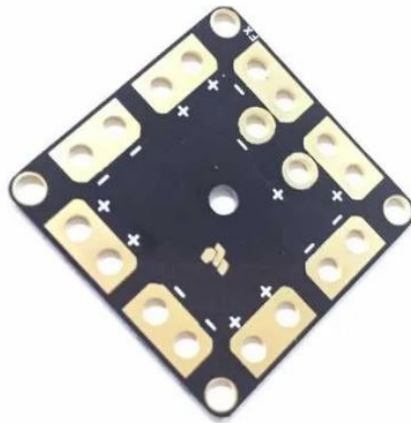
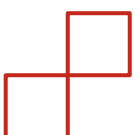


Ilustración 24 - Ejemplo de placa distribuidora.

2.4.7 Batería

Se trata del componente más importante después de la estructura en el contexto de este proyecto, ya que de todos es el que más impacto tiene en el peso final del conjunto. Como hemos visto en el estudio de soluciones similares, la tendencia es a utilizar o bien Li-po o bien Li-ion, de dos o tres celdas en serie. Atendiendo a las necesidades de nuestros variadores y motores, y buscando el menor peso posible, nuestra batería será de dos celdas en serie. Entre Li-po o Li-ion elegiremos Li-po por su mayor corriente de descarga. Aunque esto suponga una menor autonomía, con ello evitamos el posible fallo en vuelo por corte de protección de la batería, ya que el circuito de protección de las baterías de Li-ion, el BMS, prioriza la salud de las celdas e interrumpe radicalmente la conexión sin aviso previo.

En cuanto a capacidad, las baterías encontradas en el mercado cercanas a 2200mAh (siguiendo la tendencia del estudio de mercado del capítulo 2.3.1) vemos que muy pocas pesan menos de 120g, algo que complicaría muchísimo el diseño ya que nos deja muy poco margen de peso para la estructura y la carga de pago. Las



baterías de capacidades similares pero menor peso, llegan a duplicar el precio. Por todo esto, elegiremos finalmente un modelo de 300mAh del que podemos instalar dos



unidades, repartiendo con ello el peso de manera más uniforme y ganando en flexibilidad para la ubicación de éstas.

Ilustración 25 - Batería seleccionada.

2.4.8 Conectores y Cableado

No podemos dejar de lado cualquier componente que aporte peso, y esto incluye el cableado necesario para conectar entre ellos todos los equipos. Los pesos de los variadores y baterías incluyen sus cables y conectores, por lo que hemos de añadir el cable que une el receptor con el controlador de vuelo y los dos cables de potencia, positivo y negativo, que alimentan los variadores. Estos tres cables pesan 1.4g cada uno, luego en total 4.2. Los conectores de las baterías que habrá que soldar a los cables de potencia son dos y pesan 1g cada uno, luego tenemos un total de 6.2g.

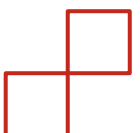
2.4.9 Masa Final Equipos

Una vez elegidos los componentes, realizaremos un estudio de masas del caso más restrictivo que nos permita conocer los márgenes de que disponemos a la hora de lanzarnos al diseño de la estructura.

| Equipo | Masa (g) | Unidades | Total |
|---------------|----------|----------|------------|
| Batería | 21 | 2 | 42 |
| ESCs | 5 | 4 | 20 |
| Naza | 25 | 1 | 25 |
| Receptor | 15 | 1 | 15 |
| Motores | 18 | 4 | 72 |
| Hélices | 5 | 4 | 20 |
| Cableado | 6 | 1 | 6 |
| Total | | | 200 |
| Margen | | | 50 |

Tabla 1 - Estudio de masas.

Vemos que dispondremos de un total de 50g para la estructura y la carga de pago. Como aproximación inicial consideraremos un resultado aceptable mantener la estructura por debajo de los 40g con la intención de disponer de 10g o más para la carga de pago, lo que supondría un 4% del total.



En el caso de instalar las hélices más pequeñas y de doble pala, se reduce el peso total en 12g, por lo que si mantenemos la estructura por debajo de 40g estaríamos contando con una carga de pago de 22g, lo que supone un 9% de la MTOM.

2.4.10 Cargador de Baterías

Para poder utilizar cualquier tipo de baterías es necesario utilizar un cargador compatible. Distintas tecnologías requieren diferentes gestiones de voltajes, corrientes, balanceado de celdas y tiempos de carga. En nuestro caso, al haber elegido baterías de LiPo, se ha buscado un cargador económico y de uso sencillo, que cumpla su cometido sin problemas añadidos.



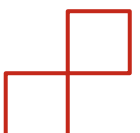
Ilustración 26 - Cargador de baterías.

2.5 Prototipo

Una vez recibidos todos los equipos se decidió que para comprobar su compatibilidad y hacer unos primeros intentos de vuelo donde valorar las reacciones y la capacidad para levantarse del suelo de todo el conjunto, era factible construir un prototipo de manera rápida y austera pero funcional.

Tras realizar las medidas pertinentes y calcular la distancia mínima a dejar entre las hélices, pasamos a unir entre ellos cuatro depresores linguales de uso médico, atendiendo a que quedasen perpendiculares dos a dos y utilizando la parte que se solapa para unirlos.

Luego recortamos un trozo de papel para realizar una plantilla con la ubicación de los taladros roscados del motor y también de su centro ya que el eje del motor sobresale y lleva instalada una arandela de tipo clip por lo que necesitan espacio



para girar libremente y no rozar. Tras recorrer los cuatro extremos de los brazos marcando los puntos necesarios, realizamos los taladros con extremo cuidado.

Con esto pasamos a instalar los componentes y nos encontramos el primer error: Los taladros de anclaje de los motores no son simétricos en su posición con respecto al cable. Si omitimos el cable, los cuatro taladros son simétricos, pero al salir este por uno de los cuatro orificios de ventilación y aligeramiento del estátor, ya se convierte en un setup asimétrico. Utilizaremos esta experiencia como lección aprendida para no repetir el error cuando comencemos con el diseño asistido por ordenador.

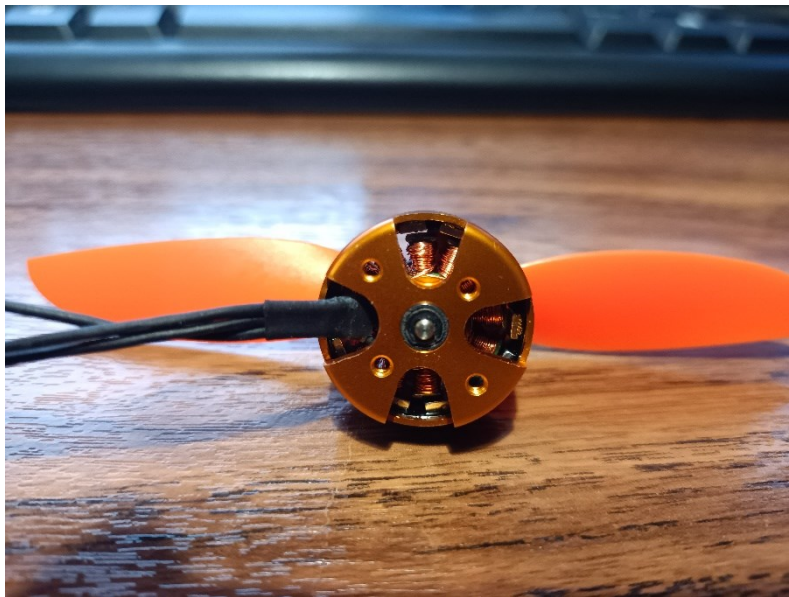
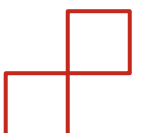


Ilustración 27 - Asimetría en el atornillado de los motores.

Para el controlador de vuelo utilizamos una goma elástica ya que debe ir firme pero flexiblemente unido a la estructura para poder detectar bien los cambios de actitud, y para el receptor y la batería no aportamos soporte estructural, quedan colgando de sus propios cables.



Con todo instalado hacemos un primer arranque y toma de contacto, y nos encontramos con el segundo imprevisto. Los motores no responden de manera proporcional a la señal recibida, dando saltos bruscos en el aumento y la disminución de velocidad de giro, traduciéndose esto en vibraciones y movimientos repentinos no controlados del prototipo.

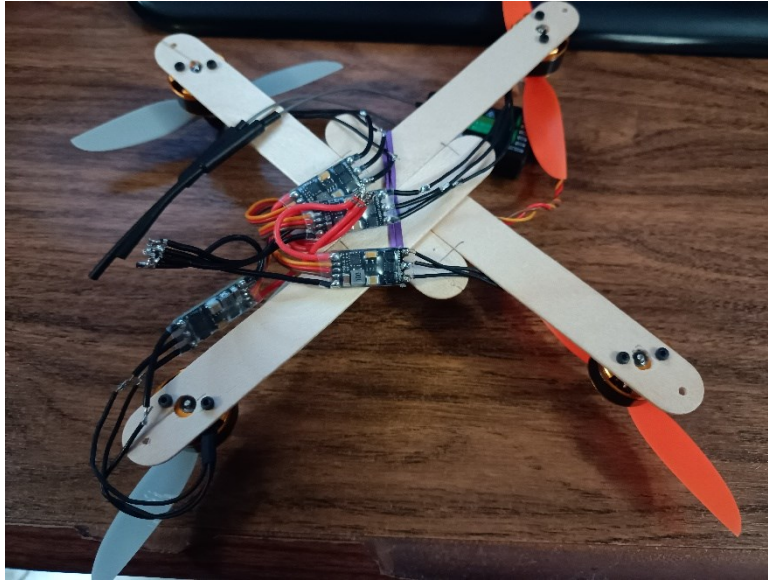


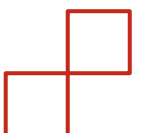
Ilustración 28 - Vista inferior del prototipo.

Tras un pequeño troubleshooting, descubrimos que los variadores necesitan ser calibrados siempre tras su compra y más adelante de manera periódica o ante la observación de problemas en el manejo del multicóptero.

El procedimiento de calibración es sencillo pero tedioso, ya que es necesario conectar cada variador uno por uno directamente a uno de los canales del receptor, de la manera tradicional. Con el variador conectado, pero sin energía, se enciende la emisora y se coloca el stick en máxima potencia, luego se energiza el variador, que hará dos pitidos utilizando el motor como altavoz. Tras esta advertencia, bajamos el stick rápidamente a mínima potencia, y si obtenemos otros dos pitidos de confirmación, habremos calibrado el variador. En resumen, la electrónica del variador necesita conocer el máximo y el mínimo de señal recibida desde el receptor de radio para repartir en todo el rango la potencia que transfiere al motor de manera proporcional.

Una vez calibrados los cuatro variadores, volvemos a conectar todo de nuevo y a realizar un segundo arranque. La lógica de funcionamiento del controlador de vuelo utiliza un ralentí de suelo para luego facilitar el despegue y que este sea más controlado. Llevando ambas palancas de la emisora hacia abajo y al centro, durante medio segundo aproximadamente, ponemos a girar las hélices a un régimen preestablecido que no provee tracción suficiente como para despegar del suelo.

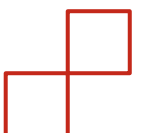
Desde este escenario, incrementamos la velocidad de giro de los cuatro motores subiendo ligeramente la palanca izquierda de la radio con el único objetivo de comprobar si los cálculos potencia peso son correctos y el multicóptero es capaz de despegarse del suelo. No intentaremos controlar ni prolongar el vuelo ya que, con la batería y el receptor mal sujetos, el centro de gravedad del aparato no es fijo y genera comportamientos falsos que pueden confundir al controlador.



Se observa que el prototipo es capaz de emprender el vuelo, aunque sin mucha agilidad, por lo que revisamos las elecciones tomadas en cuanto a motor y hélice y decidimos buscar una segunda opción para las hélices como se ha explicado en el apartado 2.4.3.2.



Ilustración 29 - Vista superior del prototipo.



3. Diseño de la Estructura

En este capítulo se explicará paso a paso el proceso seguido para resolver el reto principal de este proyecto, diseñar la estructura que una todos los componentes y haga que el multicóptero pueda volar.

3.1 Requisitos de la estructura

RPAS_STR_001: La masa máxima de la estructura no puede superar los 40g.

- Objetivo: cumplir con el requisito de masa total del RPAS dejando 10g como masa máxima de carga de pago.
- Nota: resultado de restar del total el peso de los componentes.

RPAS_STR_002: El material de la estructura debe ser PLA.

- Objetivo: facilitar las reparaciones y la reproducción de la estructura por otros usuarios.

RPAS_STR_003: Debe alojar todos los equipos necesarios: motores, variadores, controlador de vuelo, receptor, baterías y cableado de todos ellos.

- Objetivo: mantener los equipos en posición y evitar que se desconecten o dañen.
- Nota: el controlador de vuelo debe ir sobre un soporte flexible para evitar que las vibraciones distorsionen las medidas de los acelerómetros, pero de desplazamiento limitado para que no haya errores en cuanto a la lectura de la orientación espacial.

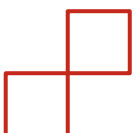
3.2 Propiedades del material

Es necesario conocer las propiedades físicas y mecánicas del material a utilizar para poder realizar un buen diseño estructural y posteriormente los cálculos de esfuerzos, deformaciones y márgenes de seguridad.

De todos los materiales disponibles en el mercado para imprimir en el entorno doméstico, elegiremos el PLA por su mayor rigidez, mayor accesibilidad, mayor facilidad de impresión y menor precio.

La siguiente opción más adecuada sería el PETg, un PET al que se añade glicol para evitar la cristalización, y que consigue una mayor resistencia/peso que el PLA y también más flexibilidad, pero con un precio un 50% mayor y un impacto medioambiental mayor. No se considera adecuado para este proyecto ya que la flexibilidad extra produciría deflexiones excesivas, deformaciones más difíciles de producir, resonancias con la vibración de las hélices, y desalineación de los vectores de empuje de cada rotor.

El ABS se reserva para objetos que necesiten soportar mayores temperaturas de trabajo o mecanizado y pintura, ya que, en otros casos, no compensaría la dificultad en la impresión. Para imprimir en ABS es necesario trabajar a altas temperaturas y en ocasiones aislar del entorno la impresora mediante una vitrina o armario, lo cual complica mucho esta opción.



Las propiedades del PLA una vez extruido son las siguientes:

- Densidad: 1240 Kg/m³.
- Módulo de Young: de 3.3 a 3.6 GPa
- Resistencia a la tracción: 47 MPa.
- Límite elástico: 55 MPa.
- Resistencia la compresión: 66 MPa.
- Resistencia a la flexión: 485 MPa.
- Resistencia a la fatiga (10⁷ Ciclos): 22.2 MPa
- Coeficiente de Poisson: 0.4.
- Tenacidad a Fractura: 3MPa · m^{0.5}.
- Temperatura de deformación: 55°C.
- Baja resistencia a la humedad.
- Elongación: 3%.
- Punto de fusión: 145°C.
- Temperatura de transición vítrea: 60°C.
- Calor específico (1,18 · 10³ – 1,21 · 10³) J/Kg · °C
- Conductividad térmica: 0,13 W/m · °C
- Resistividad Eléctrica de 3 · 10¹⁷ ohmios · cm.
- Material reciclable.

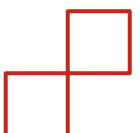
Fuentes: [Ref. 3] y [Ref. 6].

3.2.1 Anisotropía

Al igual que el resto de materiales poliméricos, el PLA es isótropo, es decir, sus propiedades tanto térmicas como mecánicas son las mismas en todas las direcciones del sólido. Al imprimir mediante FDM, necesitamos generar unas capas a partir de la geometría original de la pieza, y luego el filamento de PLA se extruye y deposita en dichas capas, lo que genera una nueva estructura interna que ya no es isótropa. Todo esto sin entrar a valorar el infill, del que hablaremos también en el correspondiente apartado.

Las consecuencias de la anisotropía son relativamente sencillas de reducir en gran medida, utilizando el cruzado de capas. A modo de ejemplo podemos pensar en el contrachapado o plywood, en el que la veta de la madera se va cruzando capa a capa, 45° o 90° según el tipo, consiguiendo con ello una mayor resistencia en todas direcciones y mejorando las propiedades de la madera maciza.

Con la tecnología FDM podemos hacer algo parecido. Podemos decir al software de slicing, que rellene las capas usando un patrón de zigzag cruzado, reduciendo de manera drástica la anisotropía del PLA impreso.



3.3 Software de Trabajo

Para la tarea tanto de diseño como de cálculo estructural utilizaremos el Autodesk Fusion 360. Autodesk es un conocido desarrollador de software de dibujo y cálculo, cuya primera herramienta en dar el salto a la fama fue el AutoCAD, uno de los programas más utilizados en arquitectura e ingeniería para el dibujo técnico asistido por ordenador.

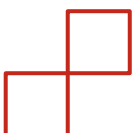
Aprovechando que Autodesk ofrece una suscripción de estudiante de un año de duración, podemos instalar cualquiera de sus herramientas sin coste y aunque estarán bloqueadas algunas de sus funciones, no son las más relevantes y podremos trabajar sin problema.

El Fusion 360 ofrece un entorno de trabajo similar a otras opciones como el SolidWorks o el Catia. Podemos empezar con un sketch o boceto en dos dimensiones, añadiendo restricciones a multitud de formas geométricas y posteriormente convertir estas formas en sólidos mediante técnicas como la extrusión, elevación o revolución.

Estos sólidos luego pueden fundirse, restarse, moverse y suavizarse para formar el objeto buscado.

Cuando tengamos desarrollado nuestro sólido, podemos mallarlo y luego someterlo a cargas y fijar o restringir otras zonas para estudiar su comportamiento, obteniendo el estrés, las deformaciones, margen de seguridad, en forma de mapeado de colores.

Finalmente podemos trocear el sólido para adaptarlo a las necesidades de la impresión FDM y generar archivos compatibles con el programa slicer para su postprocesado.



3.4 Proceso de Diseño

En este apartado describiremos paso a paso todo el proceso seguido para obtener el diseño final a partir de las inputs generadas por los capítulos anteriores.

3.5 Volúmenes de Componentes

Como primer paso, generaremos unos sólidos macizos con las mismas dimensiones que los componentes que necesitamos instalar en el multicóptero, es decir, las dos baterías, el receptor de radio, los variadores y el controlador de vuelo.

A estos volúmenes les aplicaremos un crecimiento en todas las direcciones de un 2%, para agregar unas tolerancias que compensen las retracciones del PLA al enfriarse y también para facilitar el montaje de los equipos.

Posteriormente, crearemos una trayectoria de instalación para cada componente, y construiremos un volumen de acceso que se ensanche a medida que nos alejamos del multicóptero. Con esto nos aseguramos de que ningún elemento de la estructura se interpondrá en la trayectoria de instalación de los equipos.

También será necesario crear salidas en las caras de los equipos que lo requieran, por ejemplo, el receptor necesita el hueco para sacar las antenas, y el controlador de vuelo tiene conexiones por dos de sus caras.

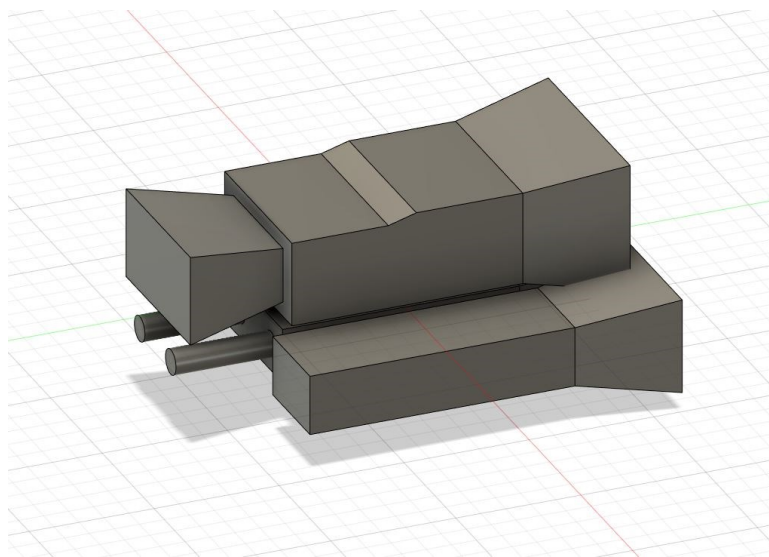
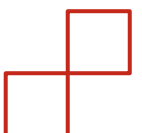


Ilustración 30 - Volúmenes de los componentes del núcleo de la estructura y trayectorias de instalación.



3.6 Ubicación de la Carga de Pago

Es el momento de decidir dónde irá colocada la carga de pago. Las instrucciones del controlador de vuelo recomiendan que sea el equipo más alto y cercano a las hélices, por lo que irá inmediatamente debajo del plano inferior de las mismas. Pensando en los posibles equipos que podrían instalarse como carga de pago, creemos que lo mejor es darle contacto visual directo con el hemisferio inferior del multicóptero, por lo que se ubicará en la parte inferior delantera del cuerpo central.

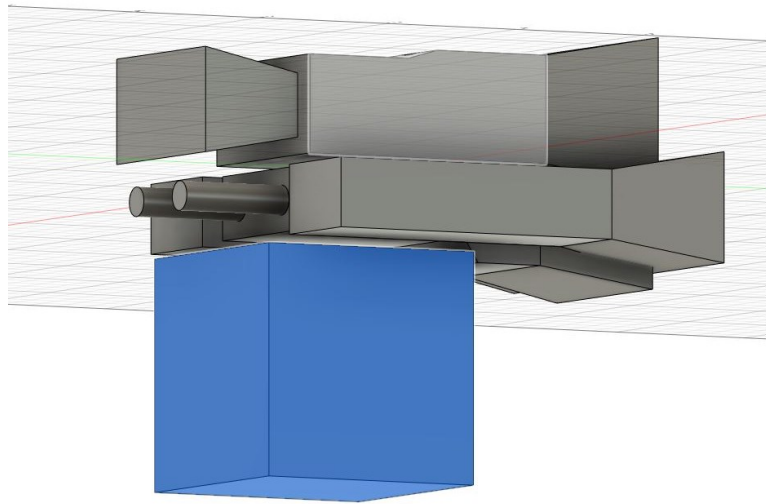


Ilustración 31 - Ubicación de la carga de pago.

Una vez creados todos los volúmenes del cuerpo central, creamos una caja que los envuelva a todos y le restamos estos volúmenes para generar los espacios que van a ocupar los componentes.

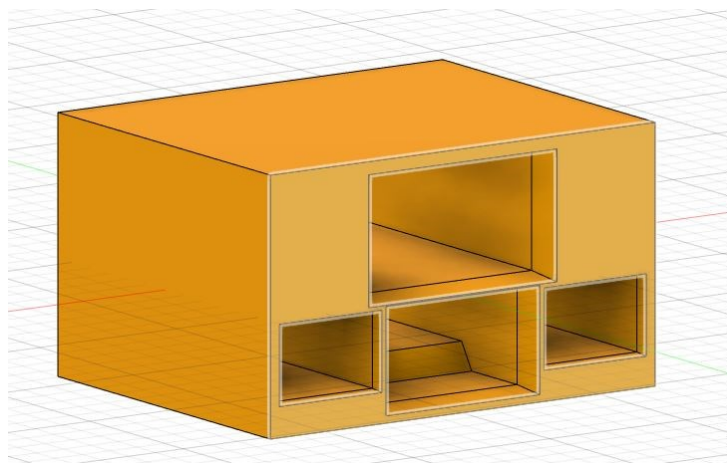
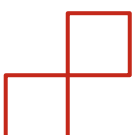


Ilustración 32 - Envoltura de la estructura del cuerpo central.

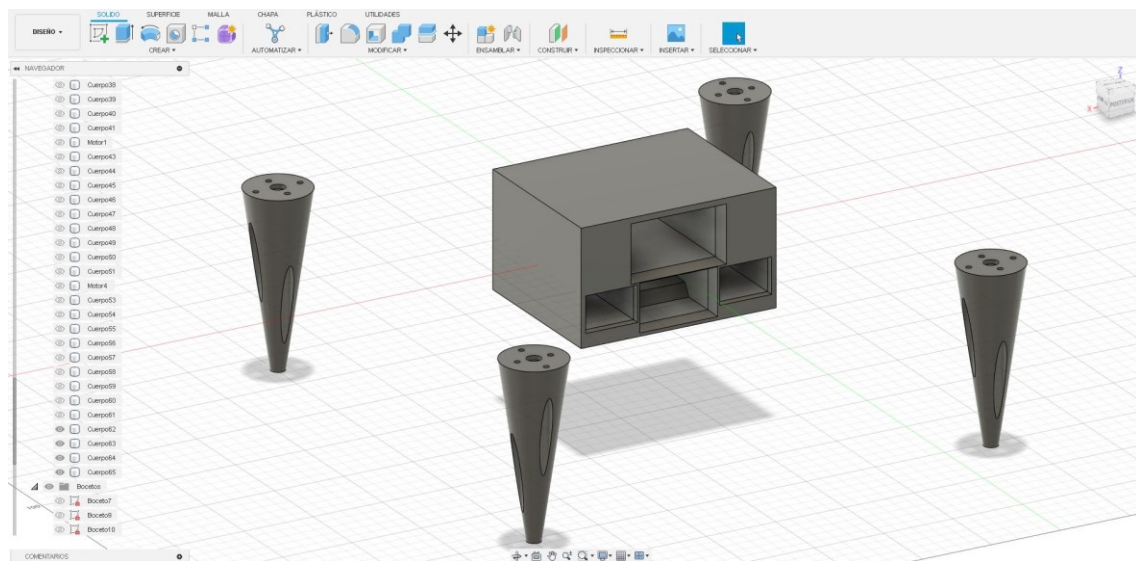
El color amarillo que se apreciará a partir de ahora es porque hemos creado y asignado al objeto el material con las propiedades del PLA extruido, para que llegado el momento de los cálculos el programa tenga en cuenta los correspondientes parámetros.



3.7 Posición de los Motores

Para situar los motores hemos tenido en cuenta dos aspectos relevantes: que las hélices queden por encima de cualquier otro equipo, y la distancia entre los ejes de rotación de las mismas. El primero se hace para evitar interferencias físicas en caso de que sea necesario cambiar a hélices de mayor tamaño (como se contempla en apartados anteriores de este documento). El segundo se hace directamente para evitar que las hélices choquen entre ellas si se utiliza un tamaño máximo que definimos en 6 pulgadas. Si se utilizan hélices más pequeñas, este espacio servirá para mejorar la eficiencia del conjunto al interferir menos las turbulencias de unas en las otras.

En un principio se utilizarán los soportes de los motores para ubicar las patas bajo los mismos, ya que son los que más base de apoyo ofrecen y por lo tanto más



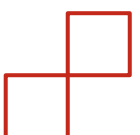
estabilidad para el aterrizaje.

Ilustración 33 - Envoltentes del cuerpo principal y de los soportes de los motores.

3.8 Envoltente para Optimización Topológica

Pasaremos ahora a crear el volumen que utilizaremos para pedir al software que nos genere una optimización topológica. Utilizaremos esta optimización como guía para comenzar a definir con precisión los elementos de la estructura. Esta tarea también se conoce como creación del negativo, ya que estaríamos creando un molde exterior que debe envolver por completo el sólido final.

Para ello uniremos las patas al cuerpo central con el método de los triángulos, es decir, creando planos avanzando en cada paso un segmento en cada uno de los elementos que tenemos que unir, creando así un brazo sólido que envolverá a la solución final.



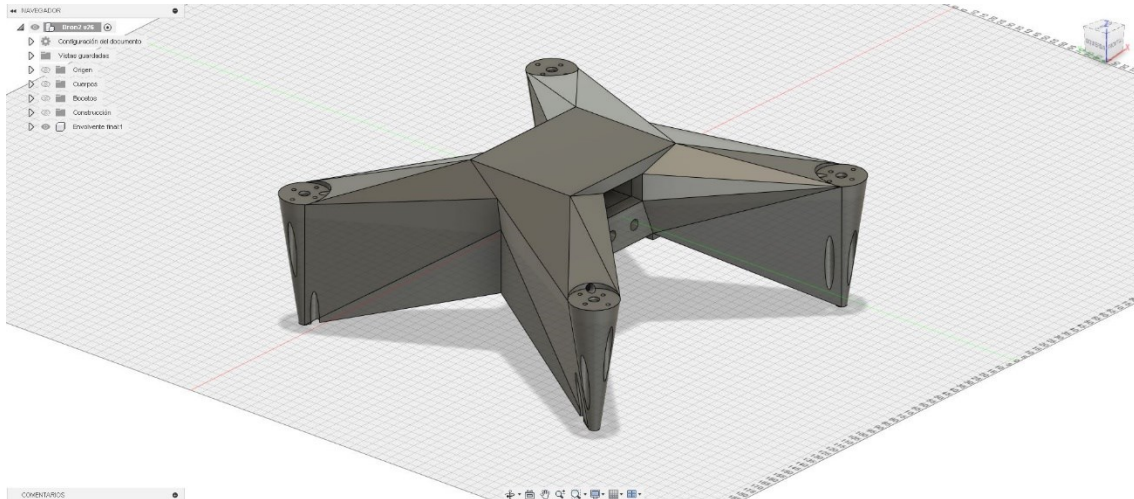


Ilustración 34 - Envoltorio completa.

Como detalle vemos que ya se ha tenido en cuenta el acceso a los tornillos de fijación de los motores, creando un vaciado de cilindros por el que entraría el tornillo y el destornillador hasta la posición final para enroscarlo.

Lanzamos entonces el cálculo de la optimización topológica, aplicando las cargas en las bases que soportan los motores, y las restricciones en las superficies en contacto con los equipos, con el siguiente resultado:

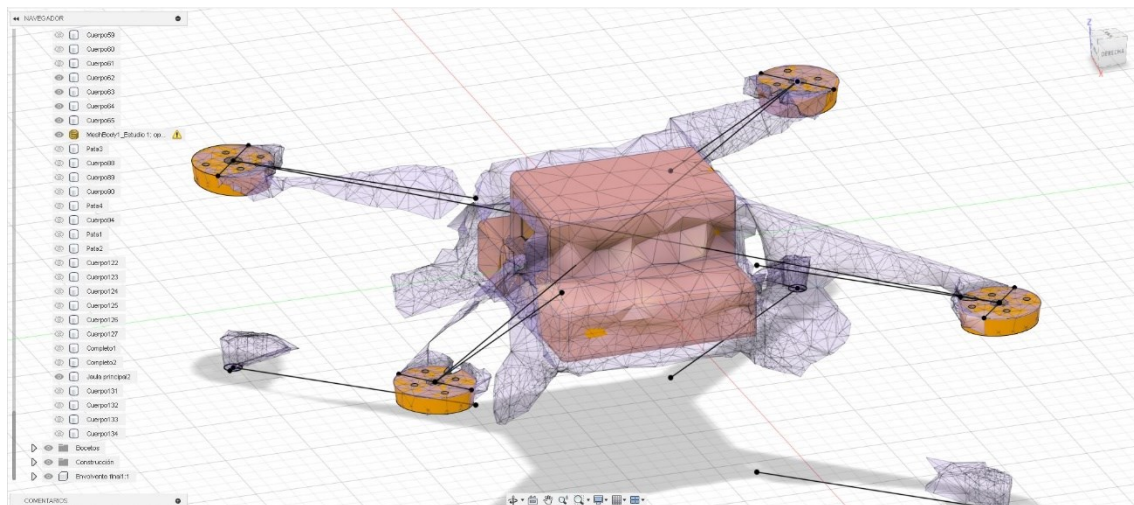


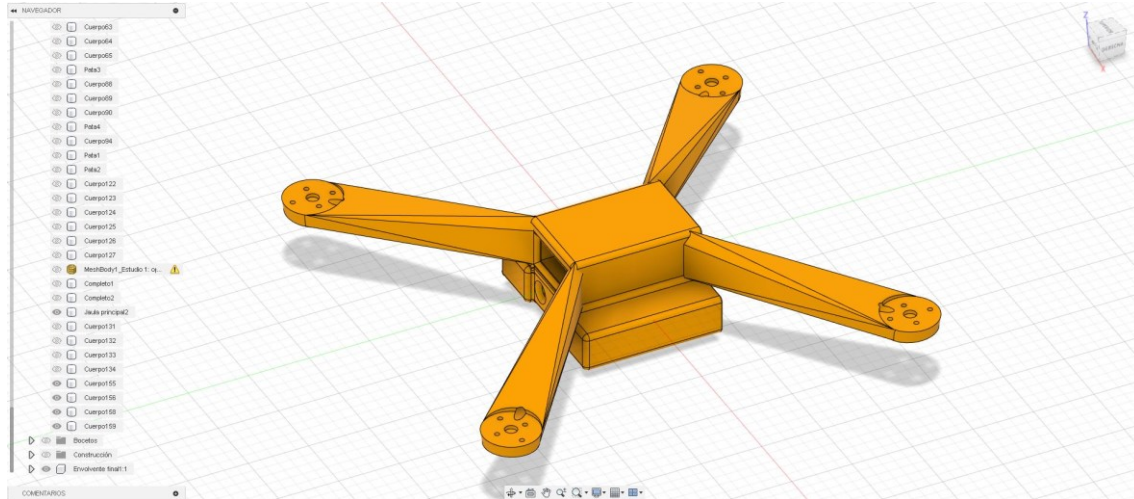
Ilustración 35 - Optimización topológica.

Observamos que el software elige el camino más corto entre los motores y el cuerpo central, manteniendo la mayor altura posible en el brazo ya que esto le da rigidez en el eje z. las patas intenta unir las al cuerpo central en lugar de a los motores, por lo que cambiaremos el diseño preliminar para adaptar nuestra solución a estos resultados.



3.9 Definición de la Estructura

Una vez analizado el output de la optimización topológica, nos disponemos a diseñar la primera iteración de la estructura. Para ello restamos a la caja central todo el volumen no necesario para contener los equipos, y desde sus aristas tomamos el camino más corto hacia las bases de los motores. Construiremos unas envolventes de brazo a la que luego aplicaremos unas perforaciones para con ello generar cuatro



tirantes dos inferiores más gruesos porque trabajarán a tracción, y dos superiores más finos porque trabajarán a compresión la mayor parte del tiempo.

Ilustración 36 - Envolventes para brazos.

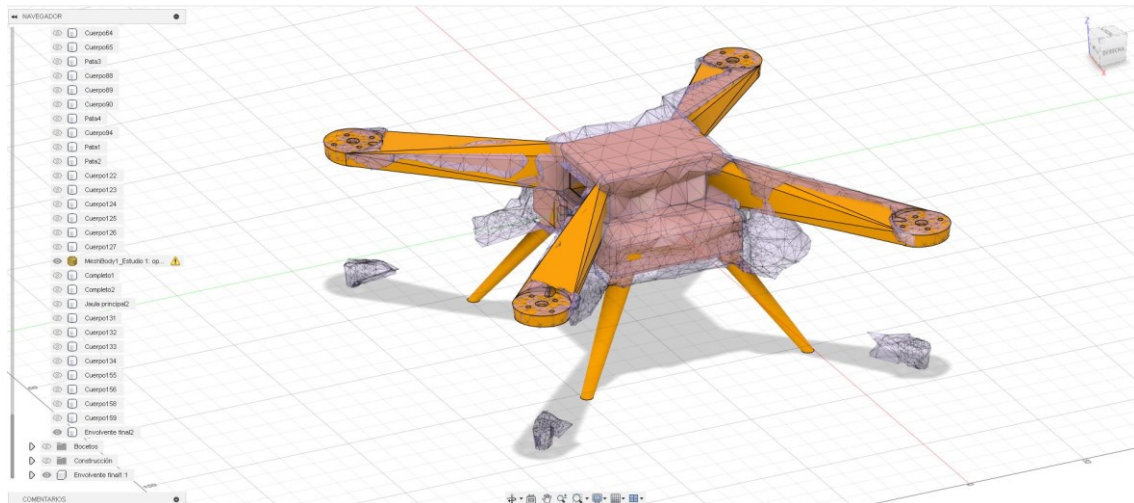
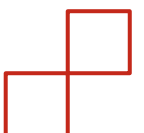


Ilustración 37 - Superposición con los resultados de la optimización topológica.



3.10 Reducción de Masa

Hacemos una primera consulta de masa y vemos que nos sale un valor cercano a los 100g, más del doble de nuestra masa objetivo, por lo que comenzamos a aligerar retirando material de manera que se creen geometrías resistentes con el menor material posible.

Entre las técnicas utilizadas para aligerar constan las siguientes:

- Eliminación del material central en brazos y patas, ya que este es el que menos carga soporta en relación con su peso, concentrándose siempre las cargas de flexión en las áreas más alejadas de la línea neutra.
- Perforación de elementos que no requieran trabajar a tracción. Reducimos así la sección de estos elementos hasta el límite que les permita trabajar a compresión.
- Rebaje del espesor en las caras planas, generando membranas donde la carga es baja y el pandeo no es factible.
- Perforado de membranas más exigidas.

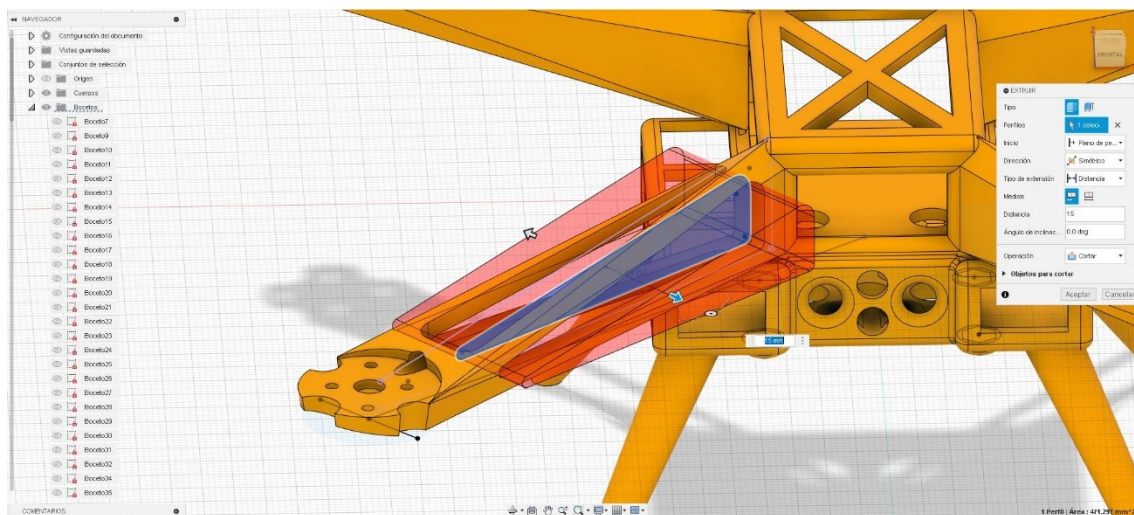
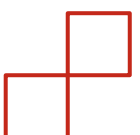


Ilustración 38 - Ejemplo de aligeramiento y creación de tirantes.

Con todo esto, conseguimos reducir la masa a 47g, todavía un valor insuficiente para el objetivo buscado.



Con mayor dificultad, comenzamos a buscar candidatos para aligerar en partes del diseño más pequeñas y que por lo tanto también ofrecen menor mejora. Utilizamos también extensamente la creación de radios de acuerdo que en el futuro permitirán reducir las concentraciones de esfuerzos y alcanzar los mismos valores de rigidez y resistencia con menos material.

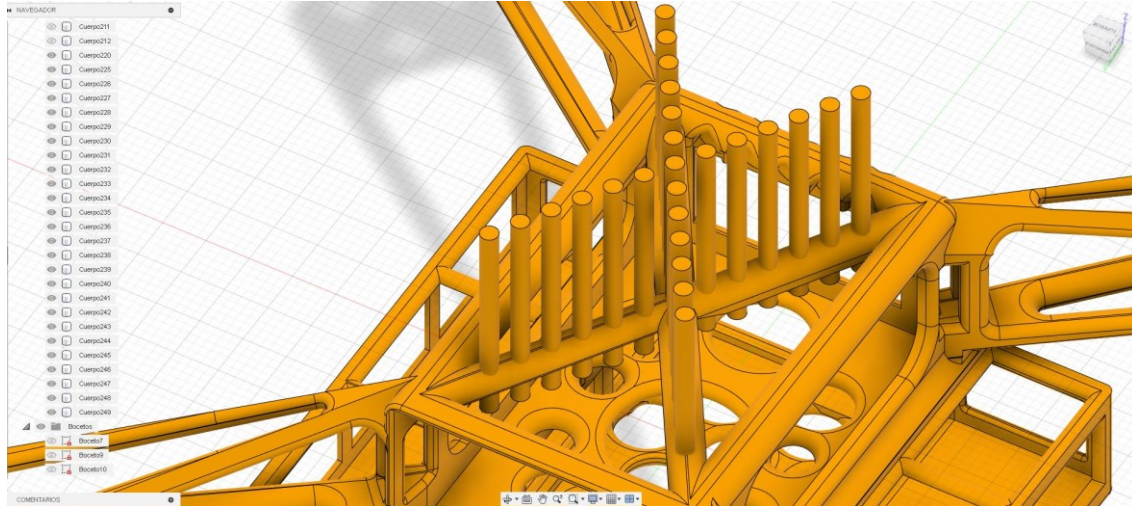


Ilustración 39 - Ejemplo de aligerado de partes más pequeñas.

3.11 Generación de la Malla

Para poder pasar al cálculo de esfuerzos, es necesario primero generar la malla que definirá los elementos finitos sobre los que se realizará el cálculo.

Para ello, Fusion 360 nos ofrece ya dentro del apartado de simulación una utilidad de mallado muy simplificada pero más intuitiva que la de otros softwares. Permite mediante unos deslizables elegir el tamaño de malla en función del tamaño del objeto, con porcentaje, y la opción de adaptar el tamaño del elemento a la geometría de cada zona se resume con una casilla donde se activa o desactiva.

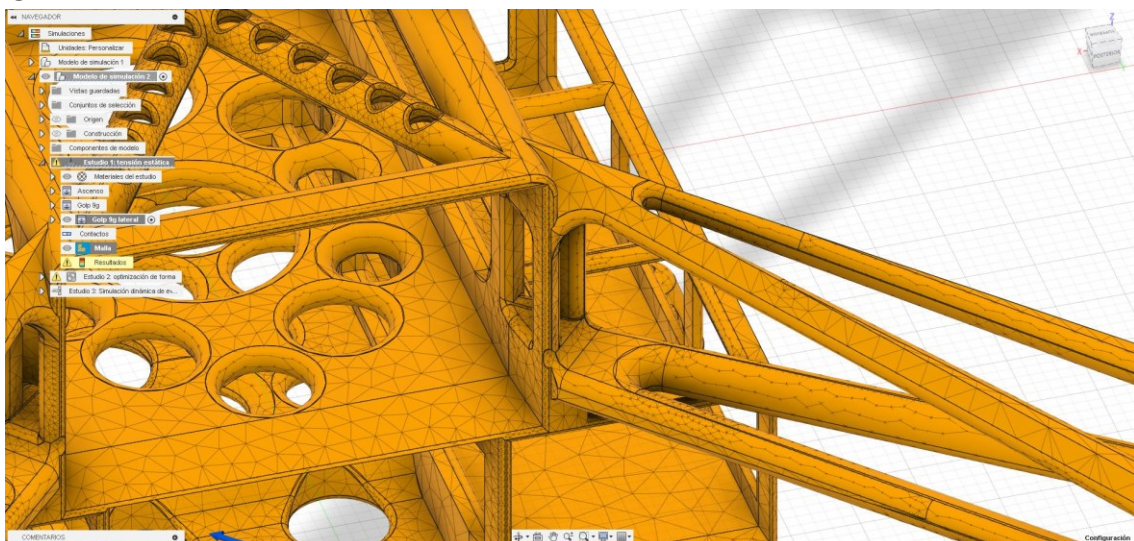
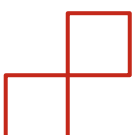


Ilustración 40 - Detalle del mallado.



En opciones avanzadas permite definir otras variables pero que no influyen de manera importante en el resultado final.

Cabe destacar que esta parte del proyecto ha consumido mucho más tiempo del previsto, ya que la generación de radios de acuerdo en toda la pieza (para evitar concentraciones de esfuerzos y aligerar, como se ha explicado anteriormente) hace que aparezcan en las intersecciones de ciertos elementos estructurales superficies de geometrías que hacen que el mallado de error. Ejemplos de esto son: superficies de tamaño muy inferior al del elemento definido, superficies muy alargadas y estrechas, o superficies con más de un ángulo muy agudo.

Todos estos casos requirieron volver al apartado de diseño para mediante bocetos, extrusiones, eliminaciones y otras herramientas, eliminar la superficie que estaba causando los problemas.

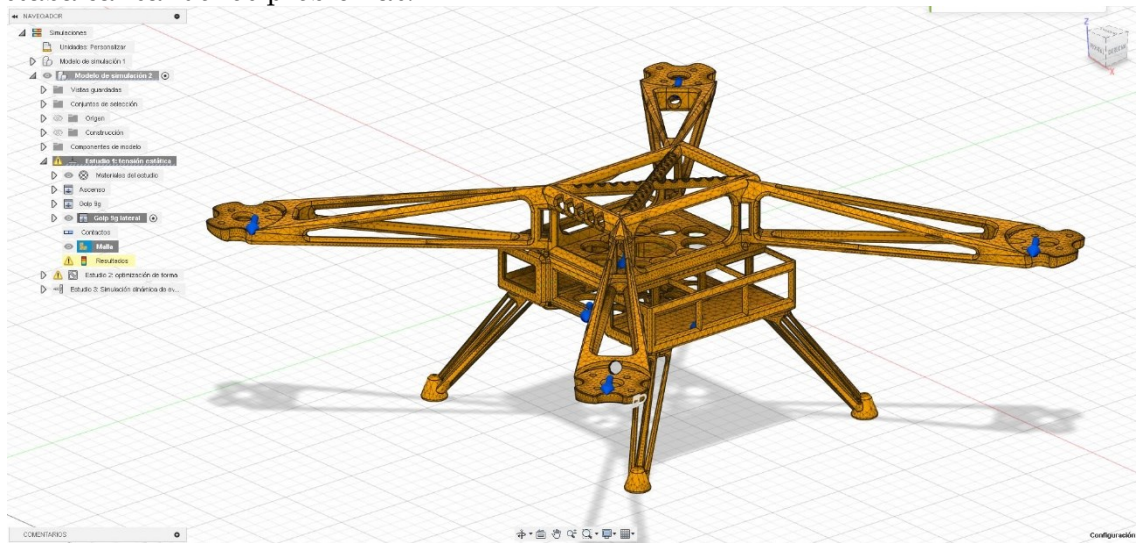
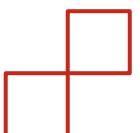


Ilustración 41 - Mallado final.



3.12 Cálculo de Esfuerzos

Pasamos finalmente a calcular los esfuerzos sufridos por los elementos finitos creados con el mallado, y a analizar los resultados.

Estudiaremos principalmente tres casos:

- Ascenso brusco: máxima tracción de las hélices; restringiremos las bahías de la carga de pago y aplicaremos la tracción máxima de los motores en las caras donde apoyan los tornillos que los sujetan, en dirección ascendente.
- Golpe vertical: simularemos una caída libre de 9g's. Este número se elige por ser el equivalente a 50cm de altura como pide el requisito establecido anteriormente. Restringiremos las bases de las cuatro patas y aplicaremos el equivalente a las 9g's de todos los componentes y la carga de pago.
- Golpe lateral: mismo caso, pero cambiando la dirección del golpe. Fijaremos la cara lateral exterior de uno de los brazos y aplicaremos el equivalente a las 9g's de manera proporcional en las ubicaciones de los cuatro motores y de la carga de pago y bahía de equipos.

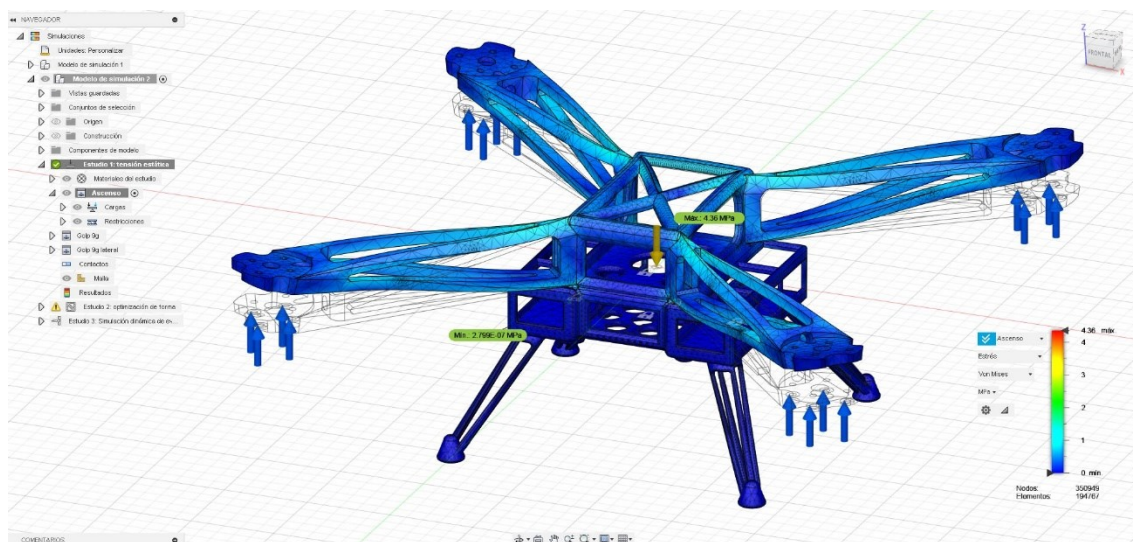
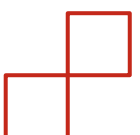


Ilustración 42 - Análisis ascenso brusco.



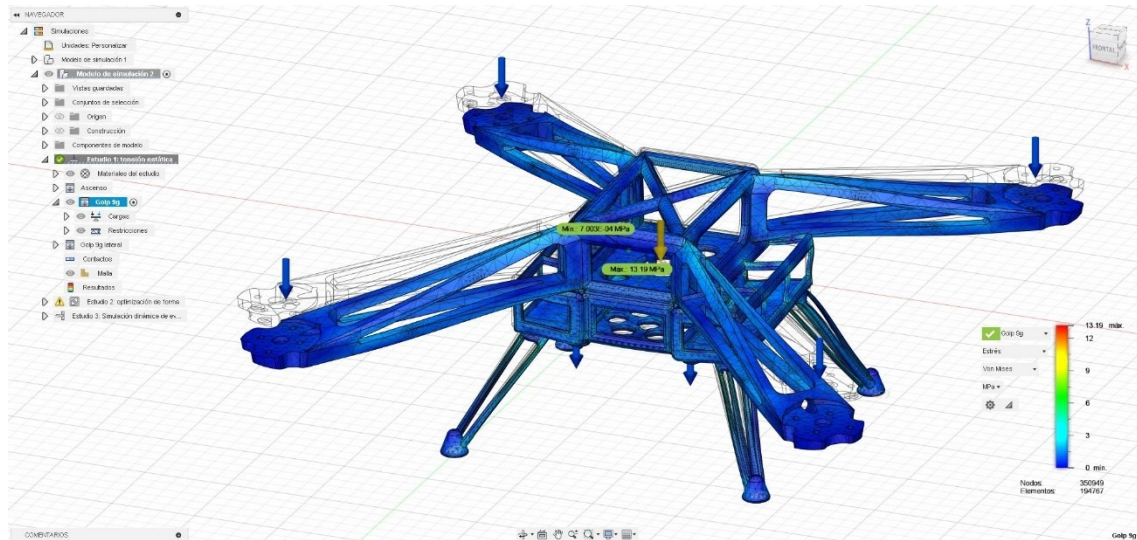


Ilustración 43 - Análisis golpe vertical.

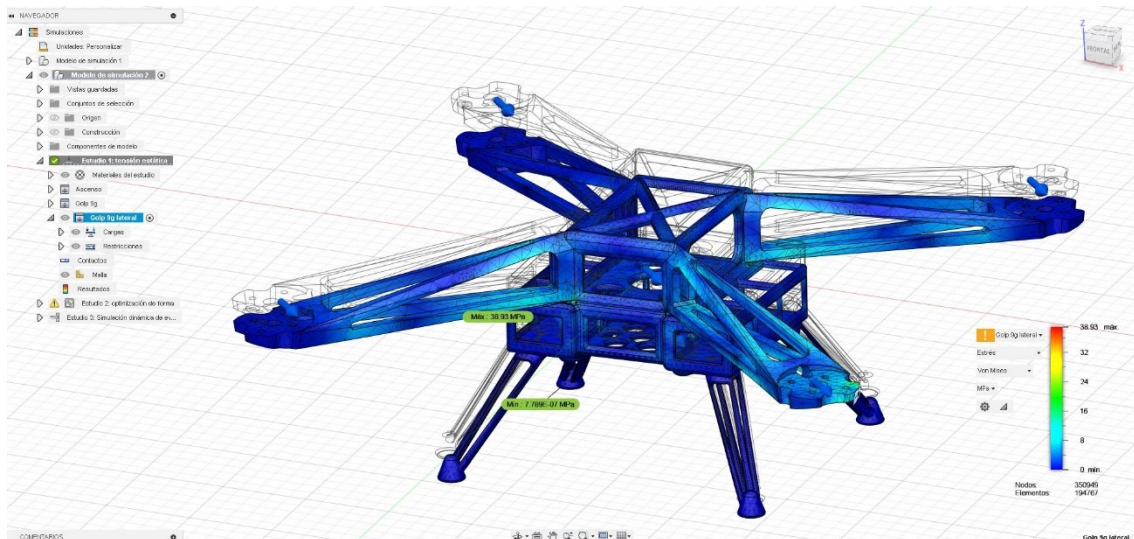
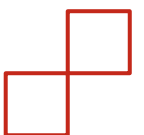


Ilustración 44 - Análisis golpe lateral.

Vemos que, de todos los escenarios, el de caída libre vertical es el más exigente. El esfuerzo máximo obtenido, de 13.2MPa, no supera el límite elástico estudiado de 55MPa del PLA, y ni siquiera el de fatiga de 22.2MPa, por lo que podemos decir que el diseño es adecuado.

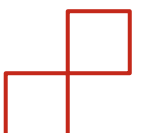


3.13 Cambio en el diseño tras la Primera Impresión

Como se verá más adelante, fue necesario rediseñar las patas del multicóptero ya que los tirantes tan finos impresos en direcciones cercanas a la perpendicular resultaban desalineados, restando gran resistencia al conjunto de cada pata.

Para solucionarlo, se crearon dos conos oblicuos concéntricos, para después restar el interior al exterior y generar un cono hueco de medio milímetro de pared. Se repitió el análisis en la zona de las patas observándose menores valores de estrés que con el diseño anterior. También se aprecia mucha mayor resistencia en comparación con la solución anterior una vez en la mano después de haberlo impreso.

También fue necesario aumentar el diámetro de los taladros para los tornillos de los motores, y los huecos para las tuercas de la carga de pago, ya que el margen utilizado no fue suficiente para compensar la retracción del PLA.



4. Fabricación de la Estructura

4.1 Descripción y Especificaciones de la Impresora Utilizada

Para imprimir los sólidos generados y que conformarán la estructura final del multicóptero, disponemos de una impresora de la marca Anycubic, modelo i3 Mega S. Se trata de una impresora ideal para principiantes, con un precio por debajo de los 200€ y que viene lista para montarse con tan solo apretar 8 tornillos.

El volumen de impresión es de 210x210x205mm, consta de base calefactada para mejorar la adherencia sin necesidad de productos químicos, y la boquilla estándar es de 0.4mm. Puede imprimir alturas de capa desde 0.1 a 0.4mm, el calibrado de la cama de impresión es manual y las temperaturas máximas son 100°C para la cama y 275°C para el extrusor. Incorpora una pantalla táctil a color para su manejo, y tiene sensor de filamento para cortar la impresión en caso de que se acabe el carrete.

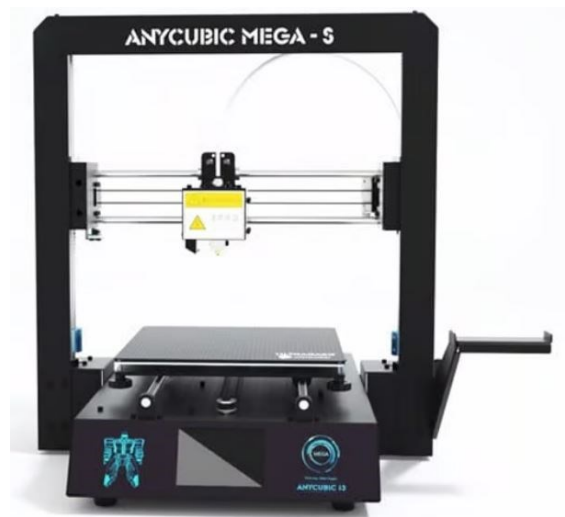


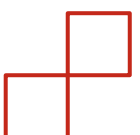
Ilustración 45 - Impresora Anycubic i3 Mega S.

4.2 Software de Trabajo

Para preparar los sólidos a imprimir es necesario utilizar un software específico. Hemos de aclarar que el Fusion 360 incorpora una utilidad para preparar los objetos para su impresión 3D, pero se ha utilizado el Ultimaker Cura por su sencillez de uso y por estar ya configurado para la impresora utilizada.

Este tipo de programa se conoce como slicer, ya que su función principal es convertir el sólido a imprimir, en una serie de capas que el extrusor irá creando gracias a los motores paso a paso que manejan los tres ejes del espacio y a uno más que extruye el filamento a través de la boquilla.

Las funciones del software van mucho más allá ya que permite modificar infinidad de variables como el espesor de las paredes laterales o verticales, la cantidad y tipo del relleno o infill que se hace a la pieza, la velocidad de impresión, temperaturas de la cama y el extrusor, y un larguísimo etc.



4.3 Generación del gCode

El uso del slicer es bastante intuitivo, se comienza cargando el archivo generado con el Fusion 360, y el sólido aparece en el volumen de impresión.

Podremos entonces orientarlo y desplazarlo a nuestro antojo, para buscar la posición y orientación óptima. Luego definiremos todos los parámetros para el slicing y la impresión, y podremos hacer un primer “capeado”. El resultado se puede previsualizar capa a capa para hacernos una idea de lo que va a ocurrir en la impresora.

Cabe destacar la capacidad del Cura para crear soportes que compensen el hecho de que las impresoras FDM no pueden imprimir en el vacío, necesitan siempre, aunque sea parcialmente, solaparse con una capa inferior para poder general voladizos. Esto se resuelve creando unas torres desde la base de impresión o desde la misma pieza si es posible.

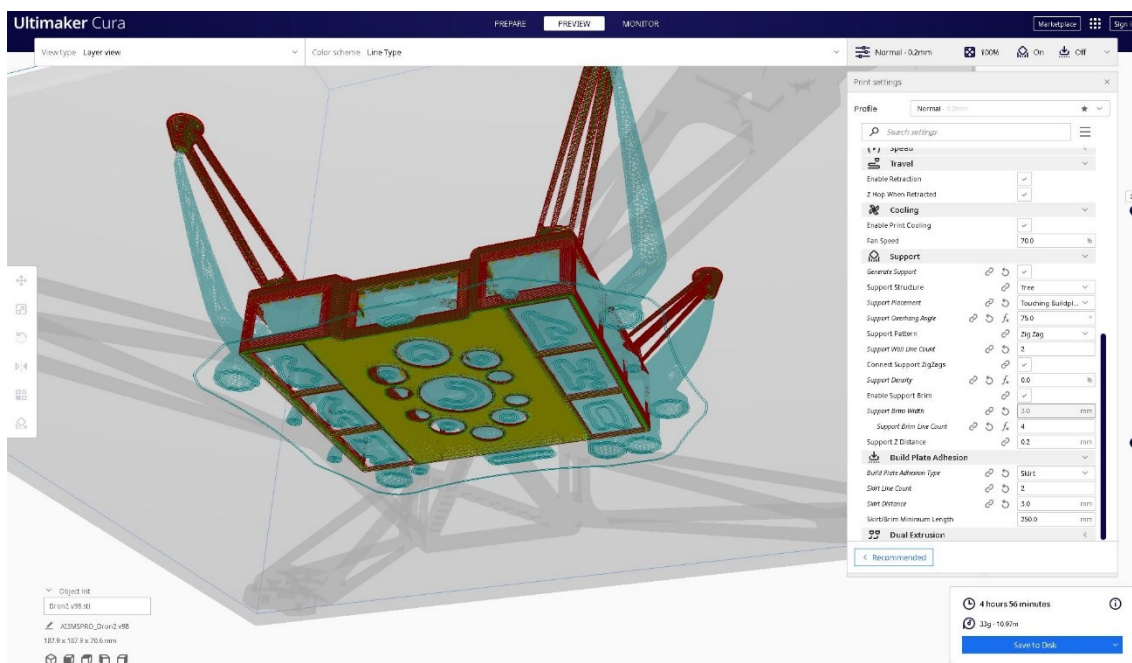
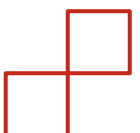


Ilustración 46 - Vista inferior de la primera impresión realizada.

Una vez estemos conformes con el resultado, podremos generar el gCode. Se trata de un archivo en el que la impresora encontrará paso a paso todas las instrucciones necesarias para imprimir el objeto. Estos archivos pueden abrirse con el editor de texto y modificarse, aunque no se recomienda porque es muy sencillo introducir algún error en la sintaxis del lenguaje y estropear la impresión.

Este código se vuelca en una tarjeta SD que luego se introducirá en la impresora y será leída para fabricar la pieza.



4.4 Secado del Filamento

Al trabajar con PLA el aspecto más importante a tener en cuenta es la humedad. Se trata de un material higrofilo y que pierde cualidades para la impresión si dejamos que absorba la humedad del ambiente. En concreto, lo que ocurre con el agua es que, al llegar al extrusor, se evapora y genera unas pequeñas explosiones que se traducen en una impresión porosa, desalineada y debilitada.

Existe una amplia oferta de dispositivos para el secado y la conservación de los filamentos, pero la realidad es que dejar el carrete algo más de una hora en el horno de la cocina con temperaturas inferiores a 50°C es igualmente válido.

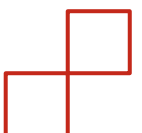


Ilustración 47 - Secado de filamento al horno.

4.5 Ajuste de la Impresora

Como preparación para la impresión únicamente es necesario revisar la altura de los desplazables laterales del eje z, ya que al no estar los husillos conectados entre ellos físicamente, ocurre que a veces uno de ellos termina la impresión anterior más alto, o más bajo que el otro, lo que hace perder la horizontal del eje x en la siguiente impresión.

Posteriormente se limpia con alcohol la superficie de impresión para asegurar la adherencia de la primera capa de la pieza, y con esto podemos poner a precalentar la impresora especificando que el material será PLA.



4.6 Impresión

Una vez caliente el extrusor y la base, podremos lanzar la impresión para que comience a fabricarse la pieza. Poco a poco la máquina irá depositando el PLA capa por capa hasta llegar a la altura final y completar el sólido.

Conviene vigilar la construcción de la primera capa al completo, ya que es la que más se ve afectada por una mala calibración y puede despegarse por el arrastre del inyector y la viscosidad del PLA fundido. Si esta primera capa se adhiere bien a la base, las probabilidades de éxito de la impresión son muy altas.

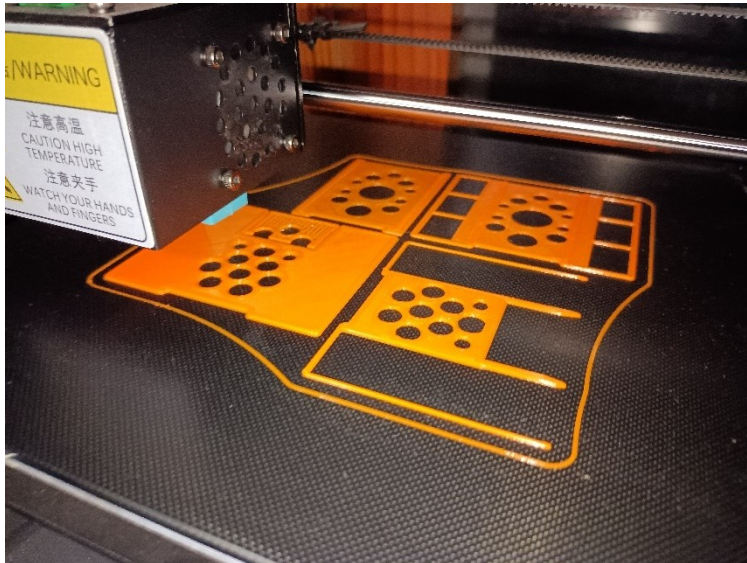


Ilustración 48 - Primeras capas de los componentes de la mitad inferior del multicóptero.

Una vez terminado, tendremos que esperar a que la base se enfríe hasta la temperatura ambiente lo que hará que la pieza se despegue con muy poquito esfuerzo por nuestra parte.

Faltaría retirar de la pieza los residuos y los soportes que hayan sido necesarios y ya estaría lista para la siguiente fase: el pegado.



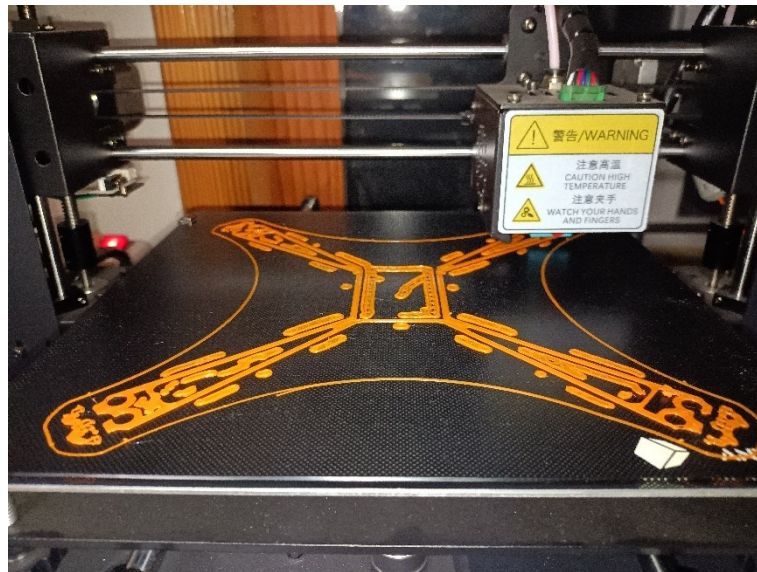


Ilustración 49 - Primeras capas de la parte superior del multicóptero.

En el primer intento de impresión se intentó reducir al mínimo el postprocesado de las piezas, dividiendo el diseño lo menos posible, y se generó el gcode que se observa en la siguiente ilustración:

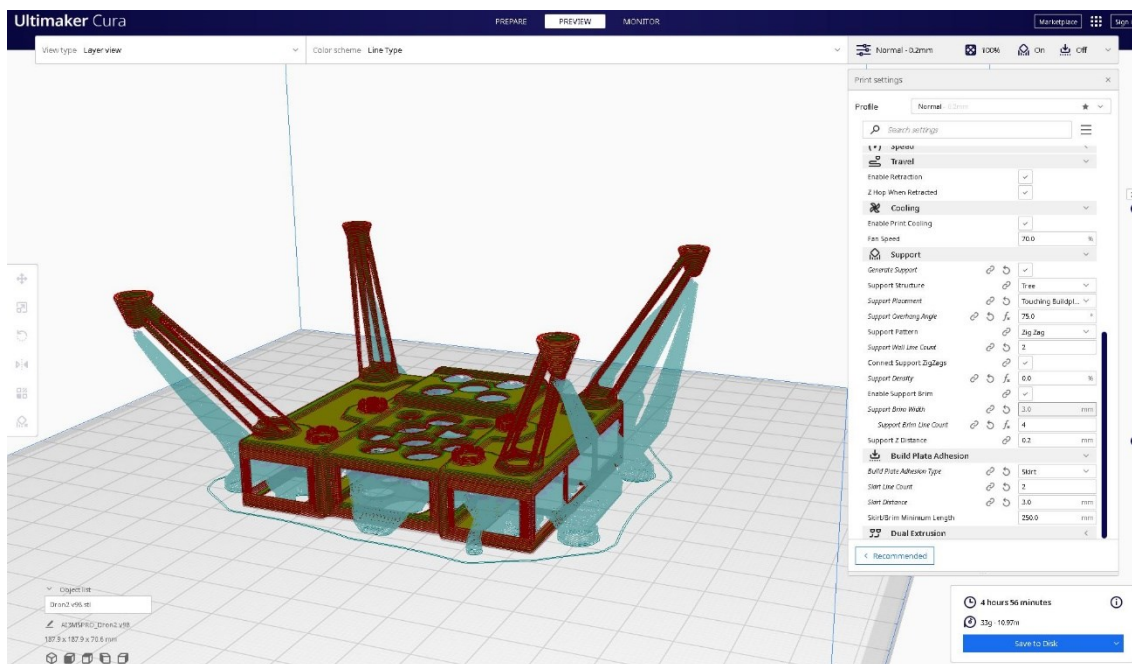
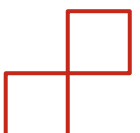


Ilustración 50 - Primer intento de impresión.

El resultado no fue adecuado ya que los soportes invadieron todo el interior de la pieza y resultaron ser más resistentes que algunas partes de ellas, por lo que era bastante difícil extraerlos sin dañar el producto final. Además, se demostró que la geometría elegida para las patas era demasiado fina para la impresora. La resistencia era tan baja que se rompieron simplemente al manipular la pieza.



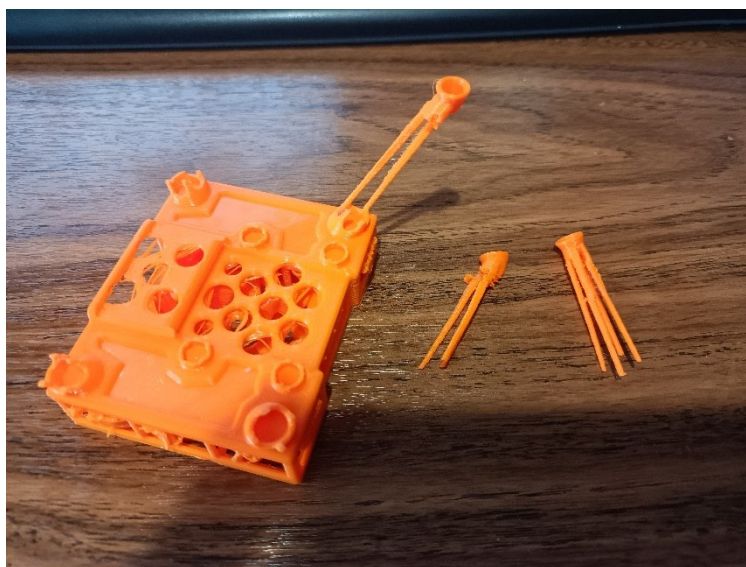


Ilustración 51 - Resultado del primer intento de impresión.

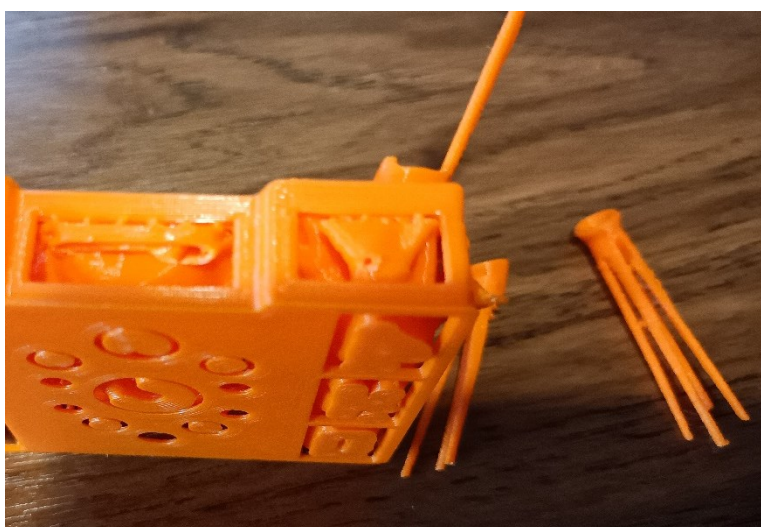
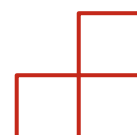


Ilustración 52 - Detalle de los soportes imposibles de retirar.



5. Montaje de la Aeronave

5.1 Montaje

El primer paso consiste en pegar las piezas que resultaron de cortar el modelo para su impresión FDM. Para mayor facilidad y simplicidad, conviene realizar dichas uniones comenzando por las piezas más bajas e ir subiendo, ya que así podemos ir colocando encima algún objeto pesado que ayude a mejorar la adhesión. Esta operación será más sencilla si utilizamos las patas propias del multicóptero para apoyar.



Ilustración 53 - Estructura completa (I).



Ilustración 54 - Estructura completa (II).

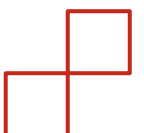




Ilustración 55 - Estructura completa (III).

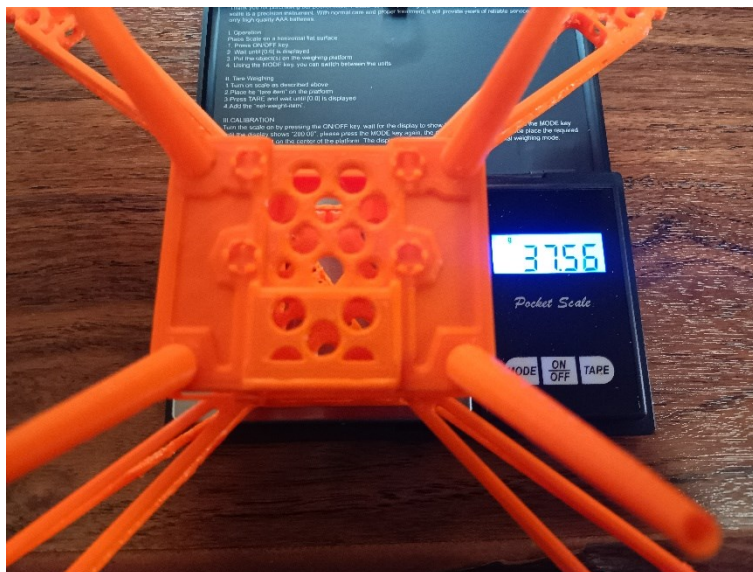


Ilustración 56 - Peso de la estructura completa.

Una vez compuesta la estructura, pasamos a instalar todos los componentes sobre ella, uno por uno, y con todos ellos en posición, comenzamos a soldar las conexiones eléctricas según convenga para el correcto funcionamiento del multicóptero. En total hacen falta 20 soldaduras. Cabe mencionar la importancia en la colocación de los motores y sus hélices, ya que dos giran en sentido opuesto a los otros dos, y para ello las roscas de los motores también son dos a derechas y dos a izquierdas.

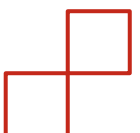




Ilustración 57 - Multicóptero completo (I).



Ilustración 58 - Multicóptero completo (II).

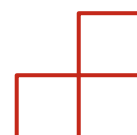
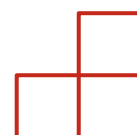




Ilustración 59 - Multicóptero



5.2 Configuración del Controlador de Vuelo

El controlador de vuelo utilizado es configurable mediante una herramienta de software proporcionada por el fabricante DJI. Como punto a destacar, la instalación fue nada intuitiva y bastante laboriosa ya que el driver está sin actualizar desde Windows Vista, y tanto Windows 10 como 11 no lo reconocen o lo tienen en su lista negra. Fue necesario reiniciar varias veces el ordenador en modo “a prueba de fallos” y en modo “permitir drivers no firmados” para conseguir que el programa se comunicase correctamente con el Naza M.

5.2.1 Software de Trabajo

Una vez instalado el Naza M Lite Assistant, que es como se denomina el software de configuración del control de vuelo, presenta varias pantallas en las que podemos comprobar multitud de parámetros. Se expondrán aquí sólo las requeridas para configurar nuestro multicóptero en cuestión.

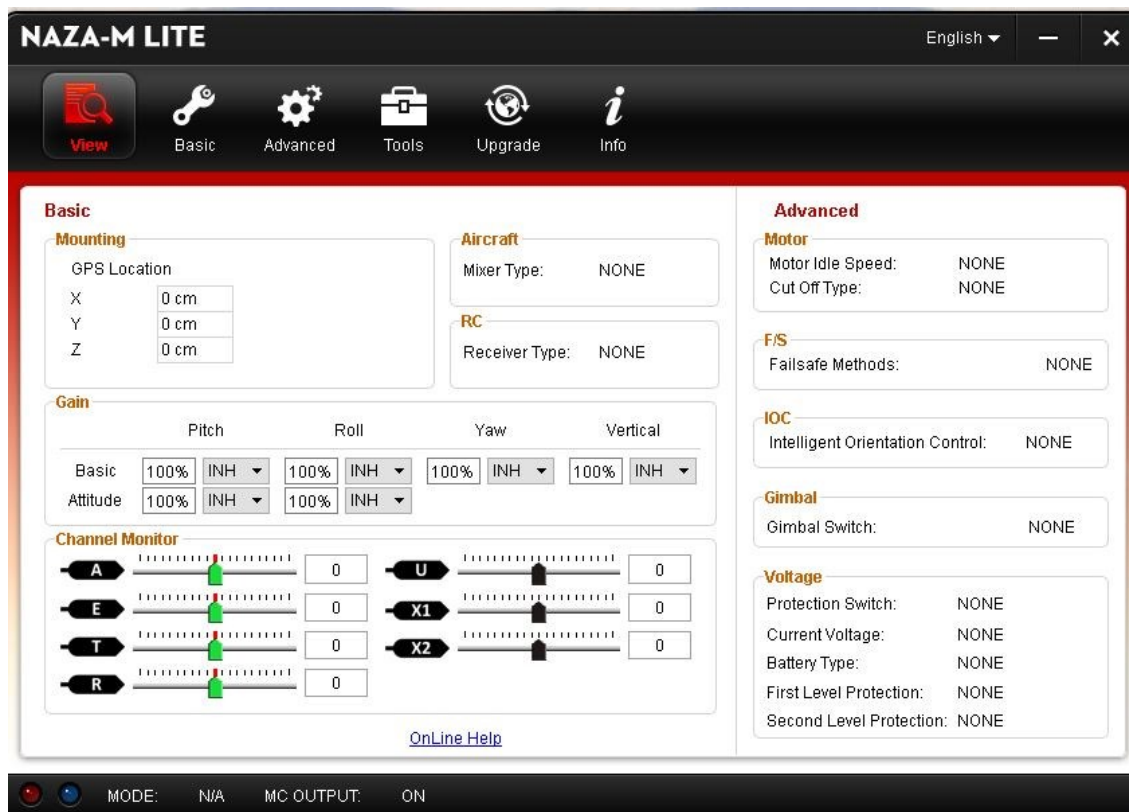
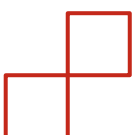


Ilustración 60 - Herramienta de configuración del controlador de vuelo (I).



En esta primera se presenta el estado actual de configuración del controlador y algunos parámetros para que pueda comprobarse, como por ejemplo la calibración de los controles o el estado de la batería.

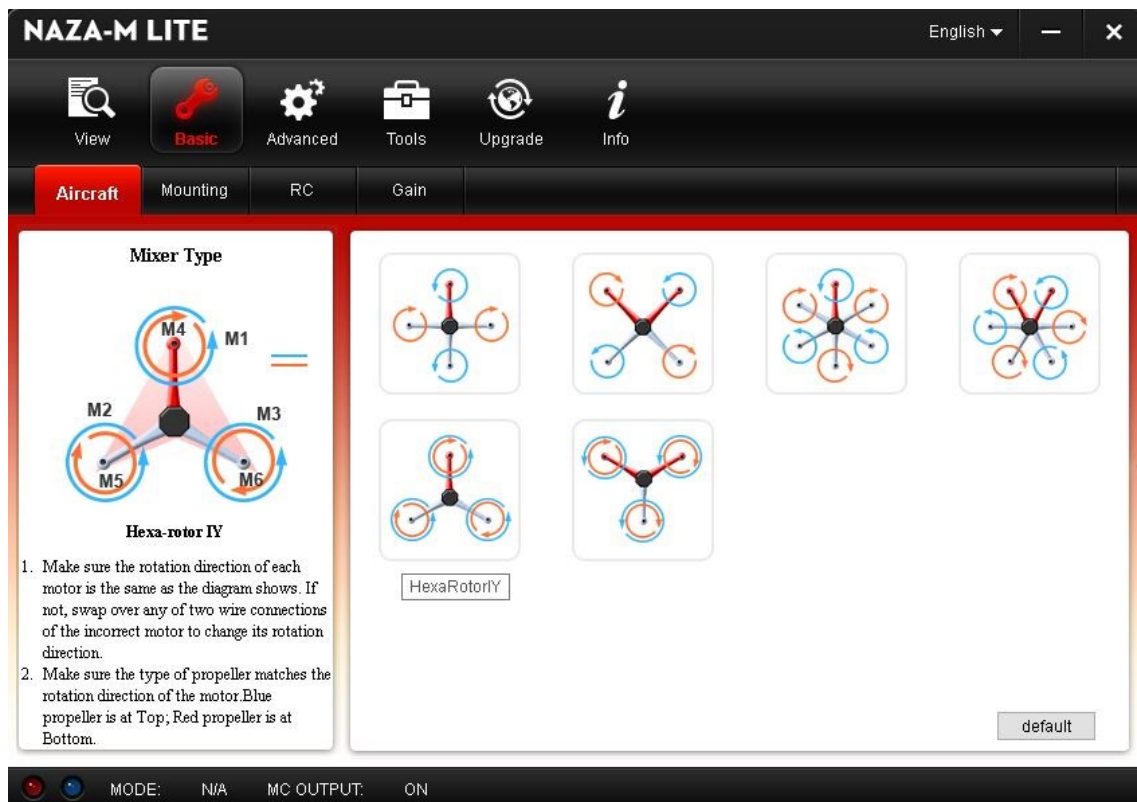
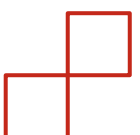


Ilustración 61 - Herramienta de configuración del controlador de vuelo (II).

En la segunda captura podemos ver las distintas configuraciones de rotores que el controlador puede gestionar, hemos de elegir la nuestra, y asegurarnos que tanto los motores como las hélices están montados según el dibujo.



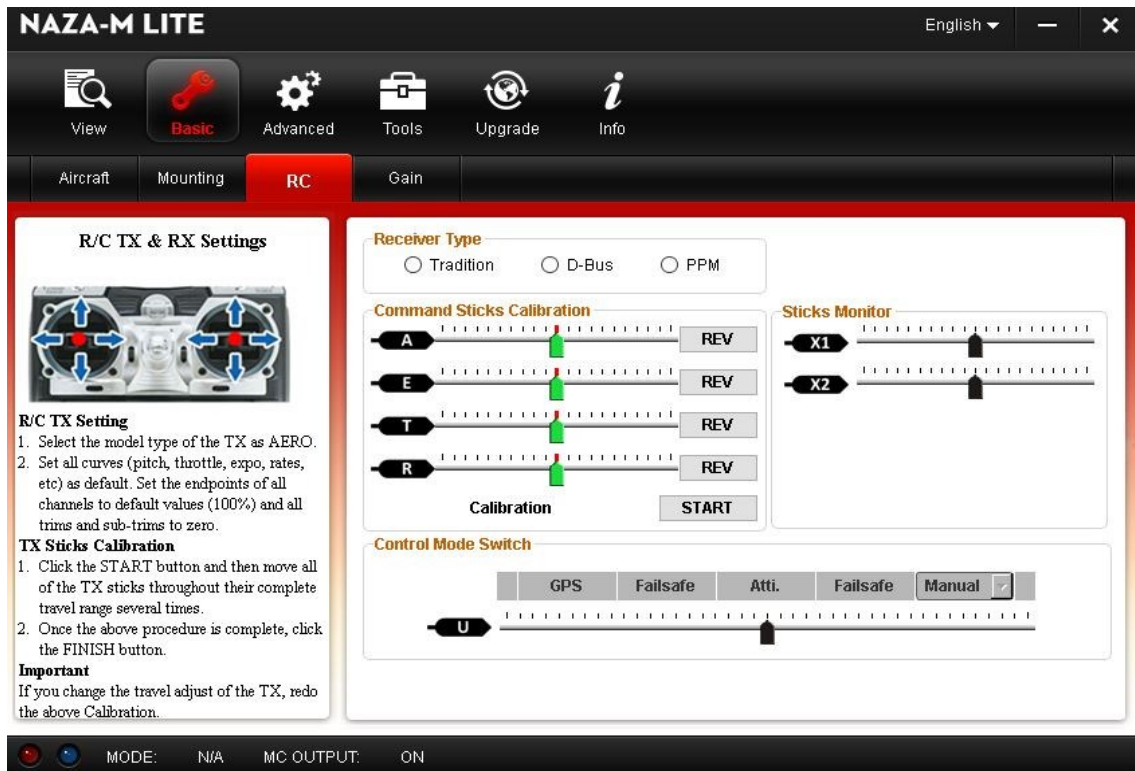


Ilustración 62 - Herramienta de configuración del controlador de vuelo (III).

En la tercera página se encuentran las utilidades de calibración tanto para los canales de la emisora como para un switch que nos permita cambiar entre los modos de vuelo del controlador.

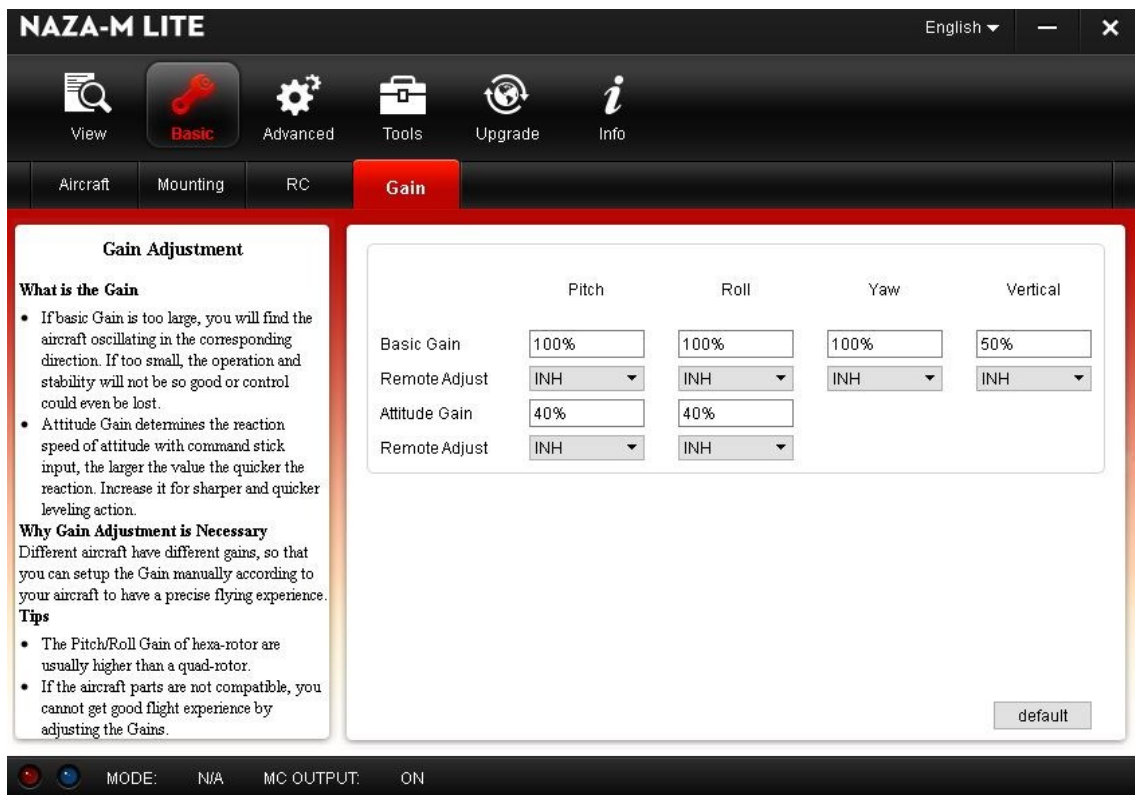
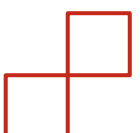
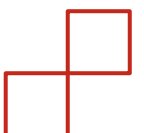


Ilustración 63 - Herramienta de configuración del controlador de vuelo (IV).



En la cuarta y última, aparecen en forma de ganancias los valores que podemos configurar para el control PID del multicóptero. Estos serán los que más dificultad entrañarán ya que deben ir modificándose mediante prueba y error hasta que se consigue un vuelo estable y de reacciones suaves, pero sin perder reactividad para poder controlar el RPAS sin desestabilizarlo lo suficiente como para sacarlo de su envolvente de actitud.



6. Plan de ensayos

Por dar un cierre con sentido práctico al proyecto y similitud con las actividades de la vida real, se planteará un plan de ensayos a seguir con las primeras unidades del multicóptero que se fabriquen.

Antes de cada intento es necesario pasar una pequeña checklist:

- Tomar todas las medidas necesarias de seguridad para evitar daños personales y materiales.
- Comprobar que todas las conexiones están correctas.
- Asegurarse de que se utilizan baterías con carga suficiente.
- En caso necesario, calibrar los variadores.
- Activar siempre primero la emisora y luego el dron, y desactivar en el orden contrario, primero el dron y luego la emisora.
- Tras todas las comprobaciones, conectar las baterías, situarlo en horizontal y alejarse convenientemente.

Secuencia propuesta:

- Toma de contacto: en un espacio abierto, sin obstáculos y sin viento. El operador deberá colocarse a una distancia que le permita distinguir la orientación del RPAS pero sin ponerse en peligro en caso de pérdida de control. El objetivo es familiarizarse con los controles y las reacciones del aparato.
- Calibración de ganancias: en esta etapa debe repetirse las veces necesarias el ciclo: vuelo de prueba - configuración de las ganancias en el ordenador, hasta que se consiga un vuelo estable y fácilmente controlable.
- Performance: en esta etapa se agregaría la carga de pago correspondiente a la configuración de las hélices instaladas, y se harían vuelos con ambas configuraciones para comparar la maniobrabilidad y autonomía de cada una de ellas.

6.1 Resultados

En el momento de finalizar este documento, se ha conseguido volar el multicóptero y nos encontramos en la fase de ajuste de ganancias. Se incluyen fotos en vuelo a continuación.

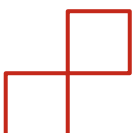


Ilustración 64 - Multicóptero en vuelo (I).



Ilustración 65 - Multicóptero en vuelo (II).

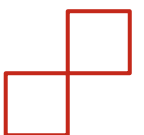
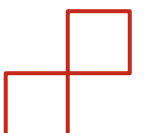




Ilustración 66 - Multicóptero en vuelo (III).



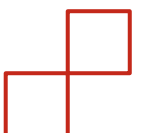
7. Conclusiones

Tras la realización de este proyecto se han recopilado las siguientes conclusiones:

- Ha resultado de muy alta complejidad y consumo de tiempo la elección de componentes compatibles entre ellos. Tanto los diferentes estándares de comunicación entre equipos como la compatibilidad motor-hélice, motor-variador, batería-variador, hacen que desde la silla y sin experiencia previa sea muy difícil elegir un setup y acertar a la primera. Es además paradójico el hecho de que para algunos componentes el mercado ofrezca un número abrumador de opciones mientras que para otros lo difícil sea encontrar una opción que se adapte a nuestras necesidades.

- Se puede observar que los motores y hélices elegidos para este proyecto están sobredimensionados: Con motores y hélices de menor tamaño, conseguiríamos ahorrar en peso en cuatro aspectos diferentes: los propios motores y las propias hélices, los variadores también podrían ser más pequeños y por último la estructura podría tener los brazos más cortos. Con todo esto, podríamos optimizar una relación potencia/peso más cercana a 2, pudiendo llevar cargas de pago mucho más relevantes.

- El Naza M no es el controlador óptimo para este tipo de multicóptero: tanto por su tamaño como por su peso, queda de manifiesto que este controlador está enfocado a multicópteros de pesos mucho mayores que el de este proyecto. Existen controladores sin caja que pesan un 75% menos, pero requieren microsoldadura, y son más complejos de configurar, sin que el precio se diferencie mucho del Naza M.

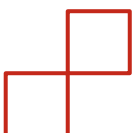


8. Desarrollo Futuro

Aparte de los desarrollos que se infieren de las conclusiones anteriores, como el uso de motores y hélices más pequeños, y controlador de vuelo y receptor de menor tamaño y sin caja contenedora, se valoran también los siguientes:

- Utilización del mismo principio de diseño de las patas en los brazos para los motores, es decir, diseñar unos brazos de tipo membrana en lugar de con tirantes, que aporten un espacio para instalar los variadores y que reduzcan el peso.
- Ejemplos de usos para la carga de pago:
 - Sniffer: dispositivo capaz de tomar y analizar muestras de aire en tiempo real, almacenando los resultados en un datalogger que puede ser leído tras el vuelo. Este dispositivo puede utilizarse por ejemplo para medir niveles de contaminación atmosférica en zonas de difícil acceso como en plataformas petrolíferas.
 - Lidar: los radares basados en tecnología láser son cada vez más pequeños y funcionales, son capaces de “leer” el terreno de cultivo para posteriormente adaptar el abonado a las necesidades de cada zona, o de realizar un escaneado de una estructura estática para buscar deformaciones o defectos.
 - Más obvio, pero no por ello menos importante, se puede instalar una cámara de vídeo capaz de transmitir en tiempo real (FPV) o que grabe y almacene para su posterior descarga. El primer caso podría ser para un uso de inspección de instalaciones de difícil acceso como torres de aerogeneradores, alta tensión, o chimeneas, y también, por qué no, como uso recreativo ya que el ver a través de unas gafas como si estuviésemos realmente montados en el multicóptero proporciona una experiencia muy dinámica y entretenida.

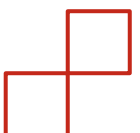
Para poder instalar cualquiera de estos dispositivos se ha dotado al multicóptero de cuatro tuercas metálicas de rosca M3 capaces de soportar el peso y las inercias de la carga de pago. Van ubicadas en la parte delantera inferior, maximizando la visibilidad y alejándose en lo posible de los motores para reducir las interferencias al máximo.



9. Presupuesto

| Concepto | Cantidad | Precio (€) | Total (€) |
|----------------------------------|----------|------------|---------------|
| Batería LiPo | 2 | 18,5 | 37 |
| Cargador baterías | 1 | 31,07 | 31,07 |
| ESCs | 5 | 9,19 | 45,95 |
| Motores | 4 | 7,71 | 30,84 |
| Hélices | 4 | 6,3 | 25,2 |
| Controlador de vuelo Naza M Lite | 1 | 108,03 | 108,03 |
| Emisora FlySky FS-I6X | 1 | 55,57 | 55,57 |
| Cables y conectores varios | 1 | 3 | 3 |
| PLA Estimado | 0,2 | 17 | 3,4 |
| Consumo estimado Impresora | 6 | 0,15 | 0,9 |
| Kit throttle springback | 1 | 8,09 | 8,09 |
| Total | | | 349,05 |

Tabla 2 - Presupuesto.



10. Bibliografía

Ref. 1: *Drone Motor Calculator*. **Szyk, Bogna. 2023.**

[https://www.omnicalculator.com/other/drone-motor#:~:text=In%20most%20cases%2C%20you%20should,example%2C%20for%20aerial%20photography\).](https://www.omnicalculator.com/other/drone-motor#:~:text=In%20most%20cases%2C%20you%20should,example%2C%20for%20aerial%20photography).)

Ref. 2: *Propeller Thrust Estimator*. **Fly Brushless Statistics.**

<https://www.flybrushless.com/tools/thrustCalc>

Ref. 3: *Ácido Poliláctico*. **Plásticos Brello.**

<https://plasticos-brello.com/material/pla-acido-polilactico/>

Ref. 4: *La importancia de la isotropía en la impresión 3D*. **filament2print.**

https://filament2print.com/es/blog/91_isotropia-impresion-3d.html

Ref. 5: *Cómo se comporta una película de ácido poliláctico*. **Hitachi.**

<https://paralab.es/blog/hitachi-como-se-comporta-una-pelicula-de-acido-polilactico-pla/>

Ref. 6: *Propiedades y Limitaciones del PLA*. **Universitat Jaume I.**

<https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poliácido-láctico/propiedades-del-pla>



Anexo A



MINISTERIO DE
TRANSPORTES,
MOVILIDAD Y AGENDA
URBANA



REGISTRO Y OPERACIÓN DE UAS DE MASA MÁXIMA AL DESPEGUE (MTOM) INFERIOR A 250 GRAMOS

Desde el 31 de diciembre de 2020 es de aplicación el nuevo marco normativo europeo de UAS (Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 y Reglamento Delegado (UE) 2019/945), que afecta a todas las operaciones de UAS independientemente de su uso (recreativo/profesional) o de su tamaño/peso y está centrada en el riesgo de la operación. En la normativa se distinguen tres categorías operacionales, de menor a mayor riesgo. Estas son: 'abierta' (A1, A2 y A3), 'específica' (STS y autorización operacional) y 'certificada'. De este modo, el vuelo de UAS/drones está sujeto a reglas generales de operación condicionadas, entre otros, por las especificaciones de los UAS, como su peso, la presencia de personas o la cercanía a edificios.

De acuerdo a lo especificado en el artículo 14 del Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947, todos los operadores de UAS deberán registrarse siempre que cumplan con alguno de los siguientes criterios:

1. **En operaciones dentro de categoría 'abierta':**
 - a. Que utilicen un UA con masa máxima al despegue (MTOM) de 250 g o más, o que, en caso de colisión, pueda transferir a un ser humano una energía cinética superior a 80 julios: y/o,
 - b. Que utilicen un UA que tenga equipado un sensor capaz de capturar datos personales (una cámara, por ejemplo), salvo que sea conforme con la Directiva 2009/48/CE ("Directiva de juguetes").
2. **En operaciones dentro de categoría 'específica':**
 - a. Que utilicen un UA de cualquier MTOM.

Por tanto, y teniendo en cuenta lo anterior, aeronaves del tipo DJI Mavic Mini o Mini 2, Hubsan Zino Mini Se ó Xiaomi Fimi X8 Mini entre otros, pese a tener una MTOM < 250 g, requieren registro como operador de UAS para volar en categoría 'abierta', ya que disponen de dispositivo que permite la captura de datos personales (cámara, por ejemplo) y su tipología no tiene cabida en la Directiva Comunitaria 2009/48/CE, al no ser considerados como juguetes por parte de los fabricantes. Por otro lado, existen UAS de MTOM < 250 g y sin sensores de captura de datos pero que por la velocidad máxima que alcanzan superarían los 80 julios de energía cinética y por tanto también requieren registro como operador de UAS; ejemplo de ellos podrían ser los drones de carreras o comúnmente denominados "racers".

Es importante señalar que el número de registro de operador de UAS deberá ir colocado de forma visible en la propia aeronave, y para operaciones dentro de categoría 'específica' además deberá registrarse la aeronave utilizada en el perfil web del operador en la sede electrónica de AESA.

En cambio, aquellas aeronaves no tripuladas con MTOM < 250 g, aunque tuviesen cámara, micrófono, etc., pero que cumplan con la "Directiva de juguetes" y así se indique en el producto o documentación facilitada por el fabricante, no se les requiere el registro como operador de UAS para volar en categoría 'abierta'.

Asimismo, para volar un UAS se requiere disponer de un mínimo de formación en función de la categoría operacional en la que se opere, siendo la categoría 'abierta', la que reúne operaciones con menor nivel de riesgo operacional. Esta a su vez, se divide en tres subcategorías denominadas: A1, A2 y A3.

Los UAS aptos para vuelo en la subcategoría A1 se corresponden con los más ligeros de masa máxima de despegue. En esta subcategoría, se requiere que el piloto esté, familiarizado con las instrucciones del fabricante o bien haber realizado formación impartida por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, para la obtención de una prueba de superación de formación en línea tras la superación de un examen en línea, ambos gratuitos. Para más información respecto a la formación de pilotos a distancia en categoría 'abierta', pinche [aquí](#).

Finalmente recordar que, además de las reglas generales de operación, existen limitaciones y requisitos adicionales en función del lugar de vuelo. AESA facilita una guía sobre estas limitaciones [aquí](#). Es responsabilidad del operador del UAS y del piloto a distancia, realizar siempre la verificación del lugar de operación previo al vuelo, y recabar las coordinaciones, permisos y/o autorizaciones necesarias para poder acometer la operación pretendida.



Anexo B



FS-i6X+User+manual.pdf

Anexo C



NAZA-M
LITE_User_Manual_v

