

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

**Diseño, modelado y fabricación de multicoptero
RPAS de 6 rotores en disposición coaxial.**

Autor: Jesús Bravo-Ferrer Moreno

Tutor: D. Francisco Andrés Valderrama Gual

Dep. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Departamento de
Ingeniería Gráfica

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

Diseño, modelado y fabricación de multicoptero RPAS de 6 rotores en disposición coaxial.

Autor:

Jesús Bravo-Ferrer Moreno

Tutor:

D. Francisco Andrés Valderrama Gual

Dep. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Carrera: Diseño, modelado y fabricación de multiróptero RPAS de 6 rotores en disposición coaxial.

Autor: Jesús Bravo-Ferrer Moreno

Tutor: D. Francisco Andrés Valderrama Gual

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El secretario del Tribunal

Índice

1-Resumen y objeto del proyecto.....	1
2-Estado del arte.....	2
3-Diseño y fabricación.....	6
3.1 Consideraciones legales.....	6
3.2 Restricciones por fabricación artesanal.....	9
3.3 Características deseadas.....	10
3.4 Configuración de motores elegida.....	12
3.5 Materiales y uniones.....	21
3.6 Sistemas.....	24
3.6.1 Control y navegación.....	24
3.6.2 Motorización.....	28
3.6.3 Baterías.....	36
3.6.4 Señal de radio.....	39
3.6.5 Transmisión de video e información.....	42
3.7 Componentes opcionales.....	48
3.8 Proceso de fabricación.....	50
4-Modelo en Catia V5.....	56
4.1 Catia como software de modelado.....	56
4.2 Metodología y designación de piezas y conjuntos.....	56
4.3 Estructura principal.....	57
4.4 Conjuntos de motorización.....	60
4.5 Hélices.....	65
4.6 Componentes electrónicos y auxiliares.....	67
5-Simulaciones y especificaciones esperadas.....	72
6-Resultados reales.....	77
7-Trabajos futuros	78

7.1 Optimización de la eficiencia de la configuración coaxial.....	78
7.2 Aprovechamiento real de la motorización redundante.....	78
7.3 Uso de baterías Primarias.....	79
8-Conclusiones.....	80
9-Bibliografía.....	81

1-Resumen y objeto del proyecto.

En el siguiente escrito, se van a describir los procedimientos que han hecho posible la fabricación artesanal del multicoptero de 6 rotores en disposición coaxial, al que nos referiremos como “dron” en adelante.

Esto incluye tanto operaciones de diseño y modelado como fabricación en sí. todas estas operaciones se han llevado a cabo de manera simultánea, ya que este proyecto es de nuevo diseño, y se requieren incontables pruebas e iteraciones en la fase de diseño-fabricación para llegar a un producto final.

Analizaremos primero el estado del arte en el que está ubicado este proyecto, así, posicionaremos al dron en cuestión dentro de los diferentes tipos de vehículos aéreos pilotados remotamente (RPAS en adelante) que existen actualmente.

Después veremos cuales son las características esperadas de este dispositivo, las cuales nos llevan a la elección del tipo de multicoptero y a las elecciones de los componentes que vamos a necesitar. Esto dará inicio a la fase de diseño y fabricación.

Una vez comenzada la fase de diseño y fabricación apareció la necesidad de un modelo en 3D que sirva de apoyo tanto para el diseño, como para las modificaciones y mejoras que van surgiendo. Así pues, el texto continuará con el propio modelo en 3D del aparato, para el cual se ha elegido el software Catia V5.

Teniendo ya todo el material anterior, tenemos la posibilidad de predecir las capacidades del dron antes de que ejecute su primer vuelo, para esto, usaremos un software muy específico que ha demostrado ser una referencia en la predicción de características de drones en desarrollo, “ecalc”.

Tras todo esto, vamos a ver el apartado más importante del proyecto, los resultados reales. Haciendo uso de los datos que podamos extraer de vuelos reales, compararemos estos resultados con los estimados antes de volar.

Y, por último, se hablará de diferentes mejoras y trabajos futuros que pueden realizarse a partir de este proyecto para continuar desarrollando este dron en si o iniciar nuevos proyectos que puedan surgir de este.

2-Estado del arte.

Empezaremos hablando de los tipos de RPAS que podemos encontrar actualmente, y lo haremos siguiendo una clasificación muy simple, y muy utilizada en el sector aeronáutico.

Así, empezamos la clasificación según el peso relativo del aparato en comparación con el aire.

Si el aparato en cuestión es más ligero que el aire, este vuela por flotación, basada en el principio de Arquímedes, esto da lugar a globos aerostáticos (Figura 2.1) y zepelines (Figura 2.2), ampliamente utilizados en observación meteorológica.



Figura 2.1: Globo aerostático.



Figura 2.2: Zepelín.

Sin embargo, si el aparato es más pesado que el aire, hablaríamos de aparatos que vuelan gracias al fenómeno de sustentación, basado en los principios de Bernoulli.

Dentro de esta clase, encontramos a su vez dos tipos de aparatos, los de ala fija, más conocidos comúnmente como “aviones”, y los de ala rotatoria, donde hasta hace poco solo había helicópteros y, actualmente, encontramos también los multirrotores.

Los RPAS de ala fija han demostrado tener una autonomía y un rango de acción muy superiores a los de ala rotatoria, y esto es algo que los hace muy interesantes para aplicaciones militares, aunque también se usan en algunas aplicaciones civiles. podemos ver dos conocidos ejemplos en las figuras 2.3 y 2.4, correspondientes a los modelos “predator” y “global hawk” respectivamente. Nótese el gran tamaño de estos aparatos, ya que, aunque el concepto de RPAS se suele asociar con aparatos de tamaños pequeños, es perfectamente aplicable a aeronaves de gran tamaño.



Figura 2.3: "Predator".



Figura 2.4: "Global hawk".

Por otra parte, los RPAS de ala rotatoria ofrecen la capacidad de vuelo vertical y vuelo estacionario que, salvo excepciones muy contadas, los RPAS de ala fija no poseen.

Esto los hace realmente interesantes tanto en aplicaciones militares como civiles, y los usos son realmente variados, desde filmación aérea hasta aplicaciones complejas como análisis termográficos, control de plantaciones, vigilancia avanzada, etc.

Dentro de este grupo es donde se encuentra el aparato desarrollado en este proyecto, y es interesante comparar los RPAS de tipo helicóptero, como el que podemos ver en la figura 2.5, con los RPAS de tipo multirrotor, como el que podemos observar en la figura 2.6, para entender porque los multirrotores han irrumpido en el campo de los RPAS, suponiendo una aparente revolución tecnológica cuando, sin embargo, no ofrecen especificaciones superiores a los helicópteros tradicionales.



Figura 2.5: Helicóptero.



Figura 2.6: Multirrotor.

Estos aparatos poseen características realmente similares en cuanto a autonomía, capacidad de carga, radio de acción, velocidad, capacidad de vuelo estacionario... sin entrar en detalles constructivos no encontraríamos diferencias importantes a la hora de elegir entre un helicóptero y un multirrotor.

Analizando los detalles constructivos es donde encontramos la diferencia clave que ha hecho que los multirrotores estén desplazando a los helicópteros, las partes móviles y la complejidad de estas. Los helicópteros tradicionales tienen un complejo sistema de

paso variable en sus rotores minado de componentes móviles, véase el rotor principal en la figura 2.7 y el rotor de cola en la figura 2.8



Figura 2.7: Rotor principal.



Figura 2.8: Rotor de cola.

Estos componentes tienen que estar perfectamente ajustados y calibrados para un funcionamiento exitoso, lo cual requiere unos conocimientos relativamente avanzados y unas operaciones de alta complejidad y costosas en tiempo.

Igualmente, estos componentes son más vulnerables a la hora de sufrir impactos o aterrizajes bruscos, generando complejas reparaciones que en ocasiones terminan con la sustitución completa del juego de rotores, y, lógicamente, su ajuste desde cero.

Por el contrario, los multirrotores solamente tienen como partes móviles los propios motores y sus hélices, (véase la figura 2.9, en la que vemos de cerca la simplicidad de estas partes móviles) haciendo de estos, unas máquinas tremendamente sencillas en montaje y mantenimiento. Además, los componentes electrónicos necesarios para hacer controlable un multirrotor, son actualmente mucho más baratos gracias al rápido avance de las tecnologías asociadas a los smartphones, ya que tanto los procesadores, como los acelerómetros desarrollados para smartphones, son utilizados para fabricar las placas que gobiernan los multirrotores.



Figura 2.9: Componentes móviles en multirrotor.

Por tanto, si bien en la explotación de cualidades podríamos decir que los helicópteros y los multirrotores compiten en condiciones similares, a la hora del montaje, mantenimiento, reparaciones, complejidad de componentes, e incluso en precio; los multirrotores aventajan a los helicópteros tradicionales lo suficiente como para haberse convertido en una revolución tecnológica, ya que ahora esta tecnología es más asequible tanto por precio, como por conocimientos necesarios para su manejo y explotación. Y por esto está cambiando el sector de los RPAS.

3-Diseño y fabricación.

3.1-Consideraciones legales.

La primera consideración que hay que tener en cuenta previamente a la fabricación de un dron es el marco legal en el que nos situamos. Algo parecido a lo que ocurre con los vehículos de tráfico rodado, cuando un fabricante saca un vehículo al mercado es clave posicionarlo dentro de los ciclomotores, o vehículos de hasta 3500Kg o bien superiores a 3500Kg. Ya que según en que grupo esté, la regulación es muy diferente tanto a la hora de homologaciones como a la hora de las licencias que permiten la conducción de estos vehículos.

Actualmente, la agencia española de seguridad aérea (AESA en adelante) es la responsable de gestionar las regulaciones que afectan al espacio aéreo, y los RPAS deben cumplir esta regulación. Dado el rápido crecimiento de las tecnologías asociadas a los RPAS, AESA está actualmente (año 2017) trabajando en esta legislación, por lo que aún no tenemos una regulación definitiva por la que regirnos. Sin embargo, gracias a las directrices marcadas por la unión europea, concretamente por EASA, que sería el homólogo de AESA, pero a nivel europeo, si tenemos una idea clara de por donde va a ir la línea de esta regulación. Así, se sabe que las categorías de drones estarán ordenadas por peso y por capacidad de operar fuera o dentro del alcance visual del piloto. De esta manera, se entiende que un dron de peso inferior a 250gr no se considerará un aparato objeto de esta regulación y podrá manejarse libremente siguiendo unas directrices mínimas de seguridad. Los aparatos de peso comprendido entre los 250gr y los 2Kg, sin embargo, deberá cumplir unas directrices algo más exigentes, entre las que destacamos:

- Necesidad de acreditación de licencia de pilotaje de RPAS expedida por escuelas aprobadas por AESA (llamadas escuelas ATO)
- Vuelo por debajo de los 120m de altura.
- Vuelo en condiciones meteorológicas aceptables y diurno.
- Vuelo dentro del alcance visual del piloto.
- Vuelo en zonas no urbanizadas y nunca sobre aglomeraciones de personas.
- Placa de identificación del propietario del aparato en el mismo dron.
- Seguro de responsabilidad civil por daños a terceros.
- No será necesario matricular el aparato ni registrarlo como tal en AESA.

Al superar los 2Kg de peso, entraríamos en la categoría comprendida entre los 2Kg y 25Kg, dentro de la cual, la diferencia más importante es que el aparato deberá matricularse y registrarse en AESA, además estos estarán regulados de manera más estricta. Y, por último, a partir de 25Kg, estos aparatos deberán, en principio, seguir una regulación de un nivel de exigencia equivalente al que debe seguir un vehículo aéreo tripulado. Teniendo en cuenta estas categorías, para el proyecto en cuestión es más que

suficiente contar con un peso máximo de 2kg, ya que 250gr es insuficiente para cargar equipos de utilidad para el campo de la ingeniería, y a partir de los 2Kg nos encontramos con una regulación más exigente que dificultaría la explotación del aparato.

Además, cabe considerar que, al estar bajo los 2kg de peso máximo, en determinadas circunstancias, se puede clasificar el tipo de vuelo como vuelo recreativo, en cuyo caso, la ley no exige licencia de piloto. Esto es crucial para facilitar la fase de desarrollo, en la que podemos volar el aparato sin necesidad de costosas licencias ni largos trámites burocráticos. En estas circunstancias, AESA solo exige respetar las siguientes indicaciones, (ver figura 3.1 en la página siguiente).

¿Qué puedo hacer con mi DRON?

El uso de un dron como hobby o como vuelo recreativo no necesita habilitación de AESA, pero debe cumplir unas normas de seguridad. Para cualquier otro uso de un dron sí hay que acudir a AESA.

¿Qué debo saber antes de utilizar un DRON?

- ✓ Siempre tengo que tenerlo a la vista y no superar los 120 metros de altura.
- ✓ No es necesario ser piloto pero se debe saber volar con seguridad.
- ✓ Sólo se pueden volar los drones en zonas adecuadas para ello. Por ejemplo, zonas de vuelo de aerodelismo, zonas despobladas, etc.
- ✓ Los daños que cause el dron son responsabilidad de quién lo maneja.

¿Qué NO puedo hacer con un DRON?

- ⊘ No puedo volarlo en zonas urbanas.
- ⊘ No puedo volarlo sobre aglomeraciones de personas: parques, playas, conciertos, bodas, manifestaciones, procesiones, etc.
- ⊘ No puedo volarlo de noche.
- ⊘ No puedo volarlo cerca de aeropuertos, aeródromos, etc.
- ⊘ No puedo volarlo donde se realicen vuelos con otras aeronaves a baja altura (zonas de parapente, paracaidismo, aeródromos, helipuertos, etc.)
- ⊘ No puedo poner en peligro a terceros.

EL DRON NO ES UN JUGUETE, ES UNA AERONAVE

El uso imprudente de un dron puede tener consecuencias.

Las multas por su uso indebido pueden alcanzar los 225.000 euros.

¡DIVERTIRSE SIGNIFICA VOLAR DE FORMA SEGURA!

Evite poner en peligro a otros aviones y a las personas y bienes en tierra.

Para más información: www.seguridadeaerea.gob.es



Figura 3.1: indicaciones de AESA para vuelos recreativos.

3.2-Restricciones por fabricación artesanal.

A la hora de diseñar el dron, es importante no olvidar cuales con las restricciones que tenemos por contar con un taller más artesanal que profesional, por tanto, debemos diseñar sabiendo que las únicas maquinas con las que contamos serán, en principio: Un taladro en columna, y una cortadora circular de mesa con disco abrasivo.

Mas adelante, y ya en las fases finales del proyecto, se añade al inventario una impresora 3D con capacidad de trabajar únicamente con material polimérico de Ácido Poli láctico, PLA en adelante. Este material, por sus limitadas capacidades mecánicas, solo se podrá usar para accesorios y piezas de nula implicación en la resistencia estructural del aparato. Podemos ver una fotografía del taladro, figura 3.2; otra de la cortadora, figura 3.3; y otra más, de la impresora 3D, figura 3.4.



Figura 3.2: Taladro en columna

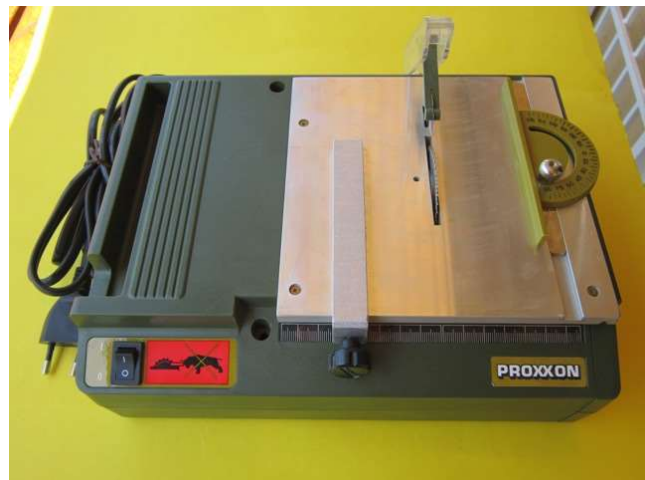


Figura 3.3: Cortadora circular de mesa.



Figura 3.4: Impresora 3D

Los materiales elegidos, y los procesos a los que se van a someter deben ser lo suficientemente sencillos como para poderse ejecutar sin problemas con estas máquinas y con herramientas de mano sencillas.

Para ayudar a que la precisión en las uniones sea máxima, los taladros para atornillar las piezas no se harán de forma independiente en cada pieza, se harán sobre las piezas ya encajadas para que el ajuste de los orificios sea exacto. Para esto, las piezas se unirán primero con adhesivos que permitan una unión estable mientras se taladra, pero a su vez se puedan retirar una vez las piezas estén taladradas, para esta función utilizamos adhesivo de doble cara de alta adherencia, ya que en la práctica ha demostrado eficacia más que suficiente para esta función.

3.3- Características deseadas.

Dentro de la propiedad impuesta anteriormente para el peso máximo, vamos a tratar de dar la máxima versatilidad al aparato en cuestión. Para esto, se intentará siempre dar soluciones lo más sencillas y robustas posibles, y a su vez, se tratará de configurar el aparato lo más modulable posible, para poder hacer cambios con facilidad y poder adaptarlo a demanda según la necesidad que se requiera en cada momento.

Como cifras aproximadas para arrancar el diseño, trataremos de obtener una carga de peso de 500gr aproximadamente, ya que, con esa capacidad, podemos cargar sin problemas pequeños equipos de alta calidad tanto en grabación de imágenes, como en análisis termográfico o de infrarrojo cercano. Por ejemplo, una cámara de tipo GoPro con un soporte giroestabilizado en dos ejes (figura 3.3.1) tiene un peso total inferior a los 300gr; un equipo de análisis termográfico giroestabilizado en 3 ejes (figura 3.3.2), pesa menos de 400gr (figura 3.3.2), y un equipo de análisis de infrarrojo cercano para agricultura de precisión (figura 3.3.3) pesa menos de 150gr. Vemos, por tanto, que una carga de peso de 500gr es más que suficiente para dar versatilidad al aparato. Esto nos deja un peso máximo del aparato en vacío de 1500gr.



Figura 3.3.1:
GoPro giroestabilizada.



Figura 3.3.2:
**Cámara termográfica
Giroestabilizada.**



Figura 3.3.3:
**Cámara de infrarrojo
Cercano.**

Si queremos maniobrar con facilidad el dron, necesitaremos un empuje al menos igual al doble del peso, así pues, necesitamos un empuje total de al menos 4kg.

En cuanto a autonomía, debemos tener en cuenta que la duración de las baterías es, sin duda, el punto más débil de estos aparatos. Es habitual, que los servicios ofrecidos por empresas que explotan este tipo de aeronaves se adapten a una duración por vuelo de entre 10 y 30 minutos, cambiando de batería las veces necesarias para dar el servicio completo. Por tanto, intentaremos que la autonomía del dron que estamos diseñando sea al menos superior a 10 minutos. Para conseguir un tiempo de vuelo muy alto, normalmente se recurre a aparatos de gran tamaño, pues así la relación peso/carga de pago es más favorable para cargar grandes baterías y además los motores suelen tener rendimientos mucho mayores cuanto mayor sea su tamaño, esto lo veremos con más detenimiento en el capítulo de la motorización. Como cifra orientativa, debemos saber, que los drones de peso inferior a 2kg difícilmente alcanzan una duración en vuelo superior a 20 minutos, podemos observar esto, por ejemplo, en un dron líder actualmente en su categoría, el “phantom”, del fabricante DJI (ver figura 3.3.4), que con un peso en vacío de 1300gr anuncia una autonomía de 25 minutos, pero que con una carga de 300gr, en pruebas reales, apenas alcanza los 20 minutos. por tanto, cabe esperar, que la duración de la batería en nuestro aparato este en el rango de los 10 a 20 minutos.



Figura 3.3.4: Dron DJI Phamton

Para el rango de acción, teniendo en cuenta las limitaciones legales (volar dentro del campo de visión del piloto), será más que suficiente con un rango de acción de 1500 metros, no obstante, es interesante considerar en el diseño, la posibilidad de ampliar este rango de acción con facilidad hasta varios kilómetros, con vista a una futura homologación del aparato dentro de una categoría superior que nos permita realizar trabajos de larga distancia con vuelos en primera persona (FPV en adelante). Esto tendrá especial importancia a la hora de seleccionar la radio con la que controlaremos el aparato y el equipo de transmisión de imagen, por tanto, se verá con más detenimiento en el capítulo correspondiente.

En cuanto al tamaño, se intentará conseguir el tamaño más compacto posible, con el fin de facilitar el transporte del aparato. Como cifra orientativa, trataremos de contener el tamaño por debajo de los 50cm de envergadura.

Un factor que afecta habitualmente a los RPAS es el viento. Sería interesante, conseguir que nuestro dron sea especialmente resistente al viento, así obtendría una ventaja competitiva respecto al resto de aparatos, que habitualmente, son muy sensibles al viento, esto no nos arroja ninguna cifra específica para ninguna especificación, pero si unas direcciones de mejora a la hora de obtener relaciones, concretamente, los multicopteros tienen mejor resistencia al viento cuanto mayor sea su relación potencia/peso, y cuanto menor sea la relación tamaño/peso. Es lógico, pues cuanto más pequeño sea el aparato para un mismo peso, menor será la superficie expuesta al viento, y cuanto mayor sea la potencia para un mismo peso, mayor será la capacidad de respuesta del dron ante perturbaciones externas. Por tanto, se intentará optimizar estas relaciones para asegurar una buena resistencia al viento.

Por último, resulta interesante también, que el aparato sea capaz de volar con algún motor dañado o incluso parado, pues el fallo de un solo motor es una de las principales causas por las que aparatos similares sufren siniestros de difícil arreglo.

3.4-Configuración de motorización elegida.

Desde el título de este escrito, sabemos que la configuración elegida es la de 6 motores en disposición coaxial, en este capítulo, se va a justificar esta elección, poco frecuente, pero prometedora para las cualidades que buscamos.

Primero, haremos un repaso de las configuraciones más frecuentes. Estas las encontramos con 4, 6, u 8 motores, a su vez, las configuraciones de 6 y 8 motores pueden disponerse con todos los motores en un mismo plano, o bien, en dos planos paralelos colocados por parejas coaxiales. Veamos un resumen de cada configuración:

- 4 motores.

La única disposición posible de este multirrotor es en un único plano. Las ventajas de esta configuración son:

- Es la más sencilla de todas al tener menos componentes.
- La geometría de chasis es igualmente la más sencilla.
- Es la más extendida, por tanto, es para la que más componentes encontramos con mayor facilidad.
- Por todo lo anterior, es la más económica de todas.
- La configuración en un plano es más eficiente que la coaxial.

Por otra parte, presenta las desventajas:

- Carece de redundancia ante fallo de motor. (Explicación detallada más adelante.)
- Potencia máxima más limitada por mínimo número de motores.
- Momento giroscópico cancelado en diferentes ejes por ser configuración plana. (Explicación detallada más adelante.)

Podemos ver un esquema de este multirroto en la figura 3.4.1, con motores orientados en "+", otro con los motores orientados en "X" en la figura 3.4.2, una fotografía en la figura 3.4.3 del modelo silverlit ufo en disposición "+", y una fotografía del modelo DJI F450 en disposición en "X".

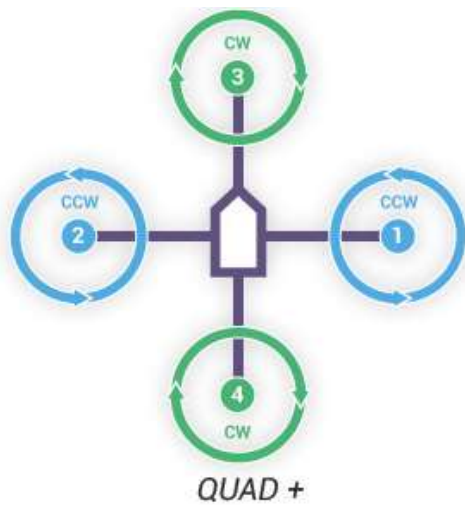


Figura 3.4.1: Esquema disposición "+"

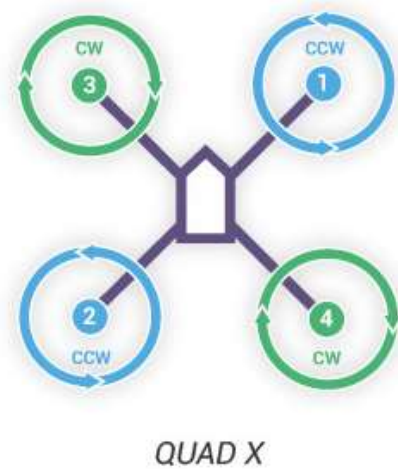


Figura 3.4.2: Esquema disposición "X"



Figura 3.4.3: Silverlit UFO



Figura 3.4.4: DJI F450

La configuración con motores en "X" es sin duda la que se ha impuesto gracias a la apertura delantera que deja para colocar cámaras u otros equipos, la configuración en "+" es difícil de ver, pero en algunos juguetes de bajo coste es posible encontrarlos gracias a que su programación es más sencilla.

Cuando decimos que este dron no tiene capacidad redundante ante fallo de motor, significa que, si algún motor falla, el dron caerá al suelo sin control ninguno, por lo que un fallo de motor supone casi con seguridad la pérdida del aparato.

Antes se comentó entre las desventajas, la cancelación del momento giroscópico en diferentes ejes, veamos que significa esto. Primero, haremos un breve repaso del concepto del momento giroscópico, sin entrar en el rigor de las ecuaciones de Newton que explican este fenómeno. Para ello, nos ayudaremos de la imagen de una rueda, con su diagrama de momentos en la figura 3.4.5.



Figura 3.4.5: Diagrama de momentos en rueda.

En la rueda de la figura 3.4.5, vemos en azul el eje de rotación de la propia rueda. Todo aquel que haya montado en bicicleta, habrá notado que, al ejercer un momento sobre el manillar, que en nuestra figura sería la flecha verde, la bicicleta parece inclinarse sola, siguiendo, la que sería en nuestro diagrama, la flecha roja. Este último efecto físico que notamos es el llamado momento giroscópico, y es la respuesta de una masa que gira cuando se le aplica un momento en un eje perpendicular al del eje de giro. En los multirrotores, tenemos las hélices girando cada una sobre su eje, y cuando ejecutamos una maniobra con el aparato, cada hélice sufrirá un momento giroscópico resultante de esta maniobra, este momento, a su vez, introducirá en nuestro aparato un movimiento no deseado, que la placa controladora compensará dando y quitando potencia a los motores adecuados en cada caso.

Sin embargo, en aquellos drones que dispongan de motores en configuración coaxial, estos momentos se cancelan entre las parejas coaxiales en el mismo eje en el que se producen, ya que en cada eje tenemos dos hélices girando cada una en el sentido

contrario a la otra, y, por tanto, no se introducen movimientos no deseados en el aparato. Esto otorga a los multicopteros coaxiales un vuelo con maniobras más suaves y más controladas, algo especialmente útil en aplicaciones de fotografía aérea.

- 6 motores en un mismo plano.

Se usa frecuentemente para cargas de pago elevadas, pues usando los mismos componentes que un quadcopter, aunque evidentemente en mayor número, obtenemos un 50% más de empuje.

Las ventajas principales son:

- Gran capacidad de carga.
- Mayor compatibilidad de repuestos con quadcopter.
- Redundancia ante fallo de motor.
- Mantiene máxima eficiencia por configuración en plano.

Y sus desventajas:

- Tamaño elevado con relación de superficie/peso alta.
- Alta sensibilidad al viento como consecuencia de lo anterior.
- Geometría de chasis más compleja
- Momento giroscópico cancelado en diferentes ejes por ser configuración plana.

La segunda ventaja mencionada, se debe a que muchas motorizaciones fabricadas para multirrotores están diseñadas de forma que no permiten montaje en coaxial, esto es porque están pensadas para hélices roscadas, las cuales solo pueden colocarse en su sentido de empuje si el motor está colocado hacia arriba, pero no es posible hacerlo si el motor está colocado hacia abajo, algo imprescindible para el montaje en coaxial, para ilustrar mejor este concepto véase la figura 3.4.6 en la que podemos ver el extremo de un brazo de multicoptero coaxial, vemos claramente que hay que montar un motor hacia abajo. Ahora veamos la figura 3.4.7 en la que vemos un kit de motorización muy extendido para multirrotores, el DJI E600, este kit está preparado para que las hélices rosquen directamente en el eje del motor, y solo en una dirección, lo cual como se comentó antes, imposibilita un montaje coaxial directo.



Figura 3.4.6: Motores coaxiales



Figura 3.4.7: Kit motorización DJI E600

Teniendo en cuenta esto, imaginemos una empresa que comienza con una flota de quadcopters que montan un kit similar al DJI E600, y más adelante tienen necesidad de ampliar la flota con drones de mayor capacidad, si eligen la configuración de 6 rotores en plano, pueden seguir utilizando los mismos kits de motorización, compartiendo así mismos repuestos, algo imposible si buscáramos un dron con motores coaxiales. Es interesante entender este hecho, pues es algo que ha facilitado la expansión de los hexacópteros planos en el mercado.

Cuando hablamos de que un multiróptero tiene capacidad de redundancia ante fallo de motor, como es el caso de esta configuración, nos referimos a que, si un motor falla, el aparato puede continuar volando con el resto de motores, y, aunque esto reduce drásticamente la maniobrabilidad del aparato, permite su recuperación.

Podemos ver un esquema de este tipo de dron en la figura 3.4.8, y una fotografía en la figura 3.4.9 del modelo DJI F550.

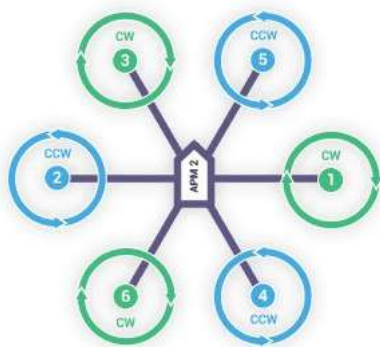


Figura 3.4.8: Esquema hexacóptero



Figura 3.4.9: Hexacóptero DJI F550

- 6 motores en disposición coaxial.

Las disposiciones coaxiales están poco extendidas, esto se debe fundamentalmente a su menor eficiencia, sin embargo, presentan ventajas que pueden resultar útiles, las principales son:

- Es el dron más compacto con capacidad redundante ante fallo de motor.
- La relación superficie/peso esta entre las más pequeñas de todas.
- Por lo anterior, tenemos una resistencia al viento elevada.
- Momento giroscópico cancelado en ejes idénticos por ser configuración coaxial.
- Apertura frontal de 120 grados entre brazos, superior a los 90 del quadcopter, lo cual facilita la instalación de cámaras de gran angular sin que las hélices aparezcan en los videos. (ver figuras 3.4.10 y 3.4.11 donde se muestran exactamente de que ángulos hablamos).

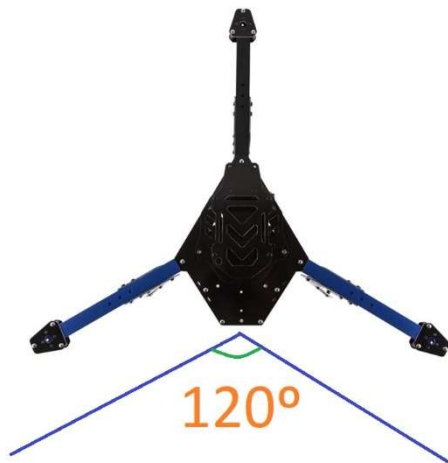


Figura 3.4.10: Ángulo en hexacóptero coaxial.

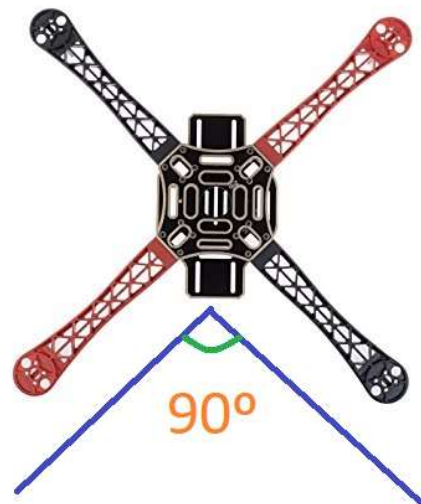


Figura 3.4.11: Ángulo en quadcopter.

Por el contrario, presentan las siguientes desventajas:

- Menor eficiencia por configuración coaxial.
- Por lo anterior, menor autonomía de vuelo.
- Montaje más complejo, especialmente para el tren de aterrizaje por conflicto con las hélices inferiores.
- Mayor masa en los extremos de los brazos por tener doble motorización, lo cual incrementa los problemas de vibraciones.

La reducción de eficiencia sufrida por los multirrotores coaxiales viene por culpa de la interferencia entre los vórtices creados por las hélices, fenómeno que no ocurre en los multirrotores planos, pensemos que las hélices inferiores se encuentran totalmente inmersas en el vórtice creado por las hélices superiores, y las hélices superiores, se encuentran en el tramo de aspiración de las inferiores. Esto aleja el comportamiento del aire del comportamiento ideal para el que están diseñadas las hélices, y genera más turbulencias de las que tendríamos si no existiese esta interferencia. El cálculo de esta pérdida de rendimiento es muy sencillo de hacer empíricamente, comparando la relación entre la potencia eléctrica consumida, y el empuje generado entre la configuración normal y la coaxial. El valor de esta pérdida está comprendido entre el 5% y el 10% de la potencia que obtendríamos en una configuración plana.

Es comprensible el hecho de que estos drones no se usen habitualmente, ya que, si los drones en general tienen su punto débil en la autonomía de vuelo, al obtener con esta configuración un empeoramiento de la eficiencia, y por tanto una menor autonomía, la idea de cambiar a otra configuración gana atractivo.

Podemos ver un esquema de esta configuración, denominada comúnmente “Y6” en la figura 3.4.12, y una fotografía real del modelo Draganflyer X6 en la figura 3.4.13.

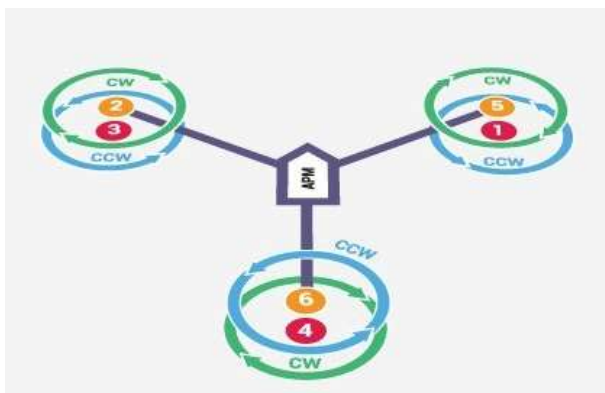


Figura 3.4.12: configuración “Y6”.



Figura 3.4.13: Draganflyer X6.

- 8 motores en disposición coaxial.

Hemos hablado antes de los drones con 6 motores en plano, que de los que los tienen en disposición coaxial, ya que los primeros son más habituales. Por el contrario, cuando elevamos el número de motores a 8, la disposición coaxial se sitúa por delante de la configuración plana. Esto es debido a que una configuración plana nos da un aparato de dimensiones muy grandes, poco práctico para su transporte. Teniendo en cuenta, que estos aparatos suelen surgir de la necesidad de cargas elevadas, su tamaño suele ser grande,

en comparación con los anteriores, podemos apreciar esto en la figura 3.4.14 donde vemos un octocóptero con esta configuración.



Figura 3.4.14: octocóptero coaxial.

Ventajas de esta configuración:

- Elevada capacidad de carga.
- Gran estabilidad.
- Alta redundancia ante fallo de motor.
- Buena relación superficie/peso.
- Por lo anterior, alta resistencia al viento.
- Cancelación de momentos giroscópicos en mismo eje.

Desventajas de esta configuración:

- Menor eficiencia por configuración coaxial.
- Por lo anterior, menor autonomía.
- Mayor masa en cada extremo de brazos, y por tanto más problemas de vibraciones.
- Montaje más complejo por las hélices inferiores, especialmente para el tren de aterrizaje.

Aunque comparte la debilidad de la menor eficiencia con el dron de configuración en “Y6”, cabe destacar, que los octocópteros coaxiales, cuya configuración se denomina habitualmente en “X8”, suelen tener una autonomía muy superior a los “Y6”, esto se debe a que suelen ser considerablemente más grandes, con lo cual, normalmente, pueden contar con motores de mayor eficiencia, y también pueden destinar parte de la capacidad de carga de pago a portar baterías de mayor capacidad.

Podemos ver un esquema de este tipo de multirrotor en la figura 3.4.15, y una foto del modelo Draganflyer X8 en la figura 3.4.16.



Figura 3.4.15: configuración X8.



Figura 3.4.16: Draganflyer X8.

- 8 motores en un mismo plano.

Aun siendo una configuración poco frecuente, puede resultar útil para grandes aparatos con una elevada capacidad de carga, y, por el mismo razonamiento que los hexacópteros planos, algunos usuarios podrían optar por esta configuración en una ampliación de flota, por compartir componentes del tipo E600 que vimos en la figura 3.4.7 de la página 15.

Sus ventajas y desventajas son exactamente las mismas que las del hexacóptero plano, ya que la geometría es muy similar.

Podemos ver un esquema de este tipo de multirrotor en la figura 3.4.17, y una foto real del modelo DJI S1000 en la figura 3.4.18.



Figura 3.4.17: Octocóptero plano.



Figura 3.4.18: Octocóptero DJI S1000.

Una vez vistas en detalle las configuraciones más comunes, la justificación de la elección del modelo de 6 rotores en disposición coaxial se basa fundamentalmente en que es el modelo más compacto que cuenta con capacidad redundante y una buena resistencia al viento. Es evidente que la propiedad más importante que hemos sacrificado al hacer esta elección ha sido la autonomía, y, por tanto, le prestaremos especial atención a este punto en la elección del conjunto de motorización y batería para contrarrestar en lo posible este punto débil.

3.5-Materiales y uniones.

Hay muchas posibilidades a la hora de combinar materiales para la fabricación de un multirrotor, pero lo que es evidente es que estos materiales deben destacar fundamentalmente por ser lo más ligeros posibles, manteniendo una rigidez mínima suficiente para garantizar la resistencia estructural del aparato. Teniendo en cuenta esto, los materiales más utilizados para fabricar drones, con sus principales características son:

- Fibra de carbono:

Altísima resistencia y peso muy bajo. Pero es un material muy caro y difícil de trabajar.

- Fibra de vidrio:

Buena resistencia y peso contenido, no es tan resistente ni tan ligera como la fibra de carbono, pero a cambio su precio es considerablemente más bajo.

- Aluminio:

Es ligero y barato, su resistencia es suficiente, aunque no especialmente elevada. Su principal contra es la facilidad con la que sufre deformaciones plásticas.

- Materiales poliméricos:

Son los que están imponiéndose cada vez más en el mercado de los drones por su bajo peso y bajísimo coste, unido a la gran facilidad de fabricación en grandes lotes. Por contra, no son tan resistentes como los materiales compuestos. Los principales plásticos que encontramos son:

- ABS: ligero, muy resistente, barato y fácil de conformar tanto por inyección como por impresión 3D, buena resistencia térmica. Es quizás el más extendido.
- PLA: Diseñado especialmente para impresión 3D, es el más fácil de trabajar para las impresoras 3D, además es barato y biodegradable, sin embargo, su resistencia mecánica es baja, y su resistencia térmica también es baja. Por tanto, su uso suele limitarse a accesorios.

- Policarbonato: Su característica más destacada es su alta resistencia, superior a todos los comentados anteriormente.
- Polipropileno: Su principal ventaja es su bajo peso, mientras los anteriores tienen sus densidades comprendidas entre los 1´2Kg/l y los 1´75Kg/l, el polipropileno tiene una densidad de solo 0,9Kg/l. Sin embargo, al ser muy flexible no está indicado para partes estructurales, pero es muy útil para carcasas y también accesorios.

Teniendo en cuenta la configuración elegida para nuestro multirroto y la limitación de peso, debemos intentar aligerar al máximo la estructura del aparato, por esto, se opta por la fibra de carbono como material principal para la estructura, ya que su relación resistencia/peso es insuperable. Teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por la fabricación artesanal, se usarán listones y planchas de fibra de carbono ya curadas.

El cálculo estructural para la elección del grosor de las planchas y los listones queda fuera del alcance de este proyecto, ya que, para dones anteriores de geometrías similares, se hicieron ensayos tanto destructivos como no destructivos, con las planchas y listones más utilizadas para fabricar drones artesanalmente, y los resultados más favorables fueron para la combinación de listones de sección cuadrada de 10x10mm con hueco circular de 7mm de diámetro, y planchas de 1,5mm de espesor.

Los primeros cálculos aproximados sobre estos componentes daban a entender que con planchas de 1mm de espesor se cumplían sobradamente las exigencias mecánicas. Para estos cálculos preliminares se aceptó la hipótesis de estructura emparrillada, que supone aproximar la estructura a una estructura plana con cargas perpendiculares a dicho plano. Algo que se ajusta muy bien a nuestro caso. Sin embargo, en la práctica, se demostró que el uso de planchas de 1mm daba problemas de vibraciones en la estructura, y por eso se elevó el espesor a 1,5mm, que sí dio resultados prácticos favorables.

En la figura 3.5.1 podemos ver el aspecto de una plancha de fibra de carbono de 1,5mm de espesor, y en la figura 3.5.2 vemos los listones descritos anteriormente.



Figura 3.5.1: Plancha de fibra de carbono.



Figura 3.5.2: Listón de fibra de carbono

Una vez elegido el material principal, hay que elegir como se harán las uniones entre diferentes piezas. Con la fibra de carbono existe la posibilidad de hacer uniones permanentes de extrema resistencia usando resina de epoxy. Esto nos daría un chasis monobloque cuya relación resistencia/peso sería óptima. Sin embargo, se ha descartado esta opción ya que al ser un proyecto en desarrollo con constantes cambios es importante contar con una estructura que permita un fácil despiece, y por tanto se puedan aplicar cambios con facilidad tanto a la estructura en si como en los componentes que estén íntimamente relacionados con esta.

La unión desmontable que mejores resultados ha dado ha sido por tornillería de nylon. Los tornillos de nylon son muy ligeros, y además tienen una resistencia perfecta para cumplir dos funciones algo dispares, por una parte, son sobradamente resistentes para el comportamiento habitual del dron, pero, a la hora de aterrizajes excesivamente bruscos o impactos, estos tornillos se rompen antes que la fibra de carbono, actuando como una especie de “fusible”, de esta manera, las cargas excesivas no se transmiten del tornillo a la fibra, protegiendo las piezas de fibra de carbono, que son mucho más caras y más difíciles de reponer.

Cuando compramos estructuras para drones prefabricadas, la tornillería suele ser de acero en métrica M2. Como el nylon, lógicamente, no es tan resistente, se ha elegido una métrica más grande, concretamente, M4. Y, dentro de la tornillería M4 se pueden elegir distintos tipos de cabeza, de las cuales, nos quedamos con la hexagonal, más resistente que las demás al uso, y muy cómoda de usar con llaves de tubo o fijas, El aspecto de esta tornillería lo podemos apreciar en la figura 3.5.3.



Figura 3.5.3: Tornillería de nylon.

Todos los componentes estructurales se harán de fibra de carbono, y se unirán con tornillos y tuercas de nylon. Pero adicionalmente, necesitaremos más piezas para hacer soportes y accesorios, como adaptadores para cargar diferentes equipos, para esto

usaremos PLA impreso en 3D por su facilidad para conseguir geometrías complejas y su bajo coste.

Por último, comentar que las uniones entre los componentes electrónicos y la estructura se harán con adhesivo de doble cara y bridas, que dan una unión suficiente para el uso del dron, pero también sencilla de desmontar a la hora de hacer modificaciones.

3.6-sistemas.

3.6.1-Control y Navegación

El sistema de control y navegación es el sistema principal del aparato, este, consta de un ordenador conectado a una red de sensores, que a su vez recibe nuestras ordenes desde un receptor externo, y con toda esta información, decide que potencia dar a cada motor en cada instante. Es el cerebro del dron. La elección de un buen sistema de control y navegación es clave, además según que sistema se instale, el comportamiento del dron puede ser radicalmente distinto, aunque el resto de sistemas sean idénticos.

Un buen criterio para empezar a elegir un sistema de control y navegación es estudiar que se incluye en la red de sensores, así, podemos intuir que capacidades podría darle al dron, por ejemplo, no podemos esperar que un dron siga una ruta de “waypoints” (Ruta descrita por puntos especificados por coordenadas UTM) si este no dispone de un sensor GPS.

Para cualquier multirrotor, se necesitan sensores que permitan la auto estabilización, esto es, que el aparato sepa mantenerse en un vuelo aproximadamente estacionario sin intervención del piloto, para esto, necesitamos dos giróscopos triaxiales, que informaran a la placa controladora de los movimientos en los 3 ejes de traslación y en los 3 de rotación. Estos giróscopos, de naturaleza electrónica, no mecánica, están incluidos en todas las placas controladoras del mercado, así que no está aquí la diferencia que nos ayude elegir entre una u otra.

En nuestro caso, para una posible explotación de naturaleza ingenieril, es conveniente que el aparato conozca su posición en coordenadas UTM, así podremos ordenarle tareas muy útiles, como seguir una ruta, mantener posición, o vuelta al punto de despegue (función RTH). Por tanto, es imprescindible contar con un sensor GPS.

Hasta aquí hay aun multitud de sistemas posibles para instalar al aparato, y con lo anterior es suficiente para garantizar vuelos estables que permitan dedicar el aparato a aplicaciones de ingeniería. No obstante, si el sistema no tiene más sensores, es demasiado vulnerable a fallos relacionados con falta de cobertura GPS. De manera que, si perdemos conexión con los satélites que permiten este servicio, Algo, que es muy habitual, nuestro aparato queda desorientado.

Para paliar este posible problema, es conveniente dotar al multirrotor de sensores más robustos, aunque perdamos precisión, con el fin de tener siempre un mínimo de posicionamiento, aunque perdamos cobertura GPS. Para esto, resulta interesante incluir

una brújula y un barómetro dentro de la red de sensores del aparato. Con la ayuda del barómetro, el aparato podrá tener una noción de la altura a la que vuela, y podrá mantenerla hasta recuperar cobertura GPS, y con la brújula, mantendrá su orientación, o incluso podrá acercarse de forma autónoma al punto de despegue, y aunque el margen de error sea muy alto, una vez este cerca, por control manual se podría aterrizar sin problema.

En nuestro caso, todo lo anterior será suficiente, pero cabe mencionar, que existen muchos sensores más que podrían incluirse en el aparato, por citar algunos ejemplos, existen sensores activos de ultrasonidos para conocer la altura de vuelo en vuelos próximos al suelo (inferiores a 5 metros), sensores laser o infrarrojos para posicionarse dentro de una red externa de sensores (utilizados para vuelos en interiores), o incluso sensores fotométricos que a través de reconocimiento de imagen pueden mantener el aparato en vuelo estacionario observando el suelo.

Es importante tener en cuenta, que el tener un sensor no implica que el ordenador haga uso de el de manera eficiente, y esto por desgracia es muy habitual cuando hablamos de la brújula y el barómetro. Multitud de placas controladoras incluyen estos sensores, pero pocas aprovechan su potencial. Un fabricante que ha demostrado como sus placas manejan con eficacia estos sensores es, DJI, y su catálogo de sistemas de navegación y control es amplio para ajustarse a diferentes niveles de exigencia y a diferentes tipos de aeronaves. Dentro de los multirrotores, vamos a destacar tres sistemas, de los cuales elegiremos uno para este proyecto. Por orden de calidad y precio, tenemos:

- DJI Naza lite:
es el modelo más básico, y el más asequible también, aunque cumple todo lo que necesitamos, no permite ampliaciones ni accesorios adicionales, por lo que el sistema queda estancado sin que podamos evolucionarlo posteriormente a su instalación. El precio de este sistema es del orden de los 100€ (año 2017). Podemos ver que aspecto tienen sus componentes en la figura 3.6.1.1.



Figura 3.6.1.1: componentes del sistema DJI Naza Lite.

En la figura 3.6.1.1 vemos, arriba a la izquierda, el módulo de potencia, este se conecta a la batería principal, sin importar el voltaje de esta, y alimenta el sistema con la potencia adecuada. A la derecha del módulo de potencia, vemos el módulo principal, este contiene el ordenador principal, además de los 2 acelerómetros triaxiales y el barómetro. Este irá conectado al receptor de radio para conocer las ordenes enviadas por el piloto, y a los motores para regular su potencia, además lógicamente de estar conectado al módulo de potencia y a los demás componentes del sistema. Arriba a la derecha, está el módulo de comunicación, con el cual a través de un cable micro USB podemos programar el sistema y además tiene un led que con un código de colores nos informa de datos relevantes a la hora de volar, como cobertura GPS y estado de la batería. El ultimo componente es el que está más bajo en la imagen, de forma redonda, este contiene el sensor GPS y la brújula.

- DJI Naza V2

Es el siguiente nivel de calidad, no difiere mucho en principio del anterior en cuanto a capacidades iniciales, pero si ha demostrado en la práctica tener más precisión, además si permite ampliaciones y es compatible con más módulos, por lo que puede actualizarse y mejorarse según las necesidades del usuario. El precio de este sistema aumenta hasta el orden de los 200€ (año 2017), y podemos ver que aspecto tiene en la figura 3.6.1.2.



Figura 3.6.1.2: Sistema DJI Naza V2

Los componentes que vemos en la fotografía, muy similares a los de la figura 3.6.1.1, cumplen las mismas funciones que los descritos para el sistema Naza Lite.

- DJI A2.

Es el más avanzado, sus sensores son de altísima precisión y sus módulos están especialmente protegidos de las vibraciones externas para garantizar un perfecto funcionamiento en las peores condiciones. Su precio ronda los 900€ (año 2017) y el aspecto de sus componentes podemos verlo en la figura 3.6.1.3.



Figura 3.6.1.3: Sistema DJI A2

En la figura 3.6.1.3, podemos identificar fácilmente los componentes homólogos a los vistos en las figuras 3.6.1.2 y 3.6.1.1, y descritos anteriormente. Y, además, vemos un nuevo componente, arriba a la derecha en la imagen, en este caso, tenemos una unidad inercial externa para aumentar la precisión en la estabilización del multirroto.

De entre estos 3 sistemas, se ha elegido la opción intermedia, el sistema DJI Naza V2, así no renunciamos a la capacidad de ampliación y tampoco entramos en una opción que nos daría lugar a un presupuesto sobredimensionado.

Ahora haremos un repaso de las cualidades que nos da este sistema de control y navegación.

Haciendo uso de los acelerómetros, el sistema podrá nivelar el aparato de forma automática, manteniéndolo horizontal hasta que se le ordene moverse en alguna dirección. También a través de estos mismos acelerómetros, y con el fin de mantener siempre los movimientos bajo control, la inclinación máxima del aparato respecto a la horizontal será de 35 o 40 grados según el nivel de asistencia preseleccionado.

Con ayuda del posicionamiento por GPS, el aparato puede mantener una posición fija, sin importar perturbaciones externas como el viento, además, podrá seguir una ruta marcada por puntos en coordenadas UTM, o bien volver al punto de despegue y aterrizar automáticamente (función RTH), tanto si se le ordena, como si pierde el contacto con la emisora.

Incluye también modos de vuelo de seguimiento de direcciones preferentes, y estas se pueden marcar tanto por GPS como por brújula.

3.6.2-Motorización.

En este sistema, incluiremos tres tipos de componente, los motores en si, las hélices, y los variadores electrónicos encargados de administrar corriente eléctrica trifásica a los motores, a este último componente nos referiremos como ESC en adelante. Empezaremos con los motores, los cuales darán paso a la elección de las hélices, y, por último, con motores y hélices seleccionados, sabremos que ESC cumplen los requisitos de potencia eléctrica para la configuración elegida.

De la elección de los motores dependerá la potencia que desarrollará el aparato y la eficiencia con la que trabaje. Necesitamos al menos 4kg de fuerza total de empuje máximo, y una eficiencia lo más alta posible, pues nuestro aparato, por su configuración, no destaca por autonomía de vuelo.

Los motores eléctricos pierden eficiencia a medida que entregan más potencia, por tanto, si queremos mantener una alta eficiencia, resulta interesante mantener el motor a un bajo nivel de carga. Por tanto, en vez de dimensionar para 4Kg de empuje máximo, debemos considerar dimensionar para un empuje máximo más alto, con el fin de que el motor en vuelo estacionario este a menos del 50% de carga, manteniendo un rendimiento alto. Tras analizar las tablas de rendimiento de los principales fabricantes de motores, se elige al fabricante EMAX, por tener una relación calidad precio muy buena, que nos permite adquirir motores de rendimientos similares al fabricante T-Motor (líder del sector) a un precio aproximado del 50% de este último.

Los motores elegidos son los EMAX MT3506 (Ver figura 3.6.2.1) capaces de darnos en total un empuje máximo de aproximadamente 5,5Kg (sumando los 6 motores) y manteniendo en vuelo estacionario una eficiencia aproximada de 9gr/w (gramos por vatio es la unidad en la que los fabricantes de motores eléctricos para multirrotor dan la eficiencia de sus motores).



Figura 3.6.2.1: Motor EMAX MT3506

Para hacernos una idea de cuanto de buena es esta eficiencia, los drones de carreras, diseñados para alto desempeño y no alta eficiencia, se mueven a unos 3gr/w, y los drones más grandes y de mayor eficiencia del mercado, difícilmente llegan a 15gr/w. En medio podríamos incluir modelos de muy buen rendimiento y tamaño similar al nuestro como son el DJI mavic pro o phantom, cuyas eficiencias rondan los 8gr/w.

Una vez elegidos los motores, y, ayudándonos de las tablas ofrecidas por el fabricante, podemos pasar a elegir el resto de componentes. Estas tablas podemos verlas en la figura 3.6.2.2 y 3.6.2.3. Además, el fabricante facilita unos planos, de los que podemos obtener todas las dimensiones necesarias para el diseño de piezas implicadas en el conjunto de motorización, estos planos podemos verlos en la figura 3.6.2.4.

En la figura 3.6.2.2, vemos la primera tabla de características ensayadas para el motor elegido. En esta, podemos analizar los datos correspondientes a la selección de una batería de 3 celdas en serie de tipo litio polímero, con diferentes combinaciones de hélices, que van desde las 11" hasta las 14" de diámetro. En la figura 3.6.2.3, vemos una tabla similar a la anterior, pero, con datos relacionados con la selección de una batería de 4 celdas, y hélices desde 10" hasta 13".

Teniendo en cuenta la cantidad de combinaciones posibles, y de datos a manejar, usaremos para analizar toda esta información, una herramienta informática destinada al análisis de datos y visualización gráfica de los mismos, "QlickView". Introduciendo los datos en este programa, podemos realizar con facilidad y rapidez multitud de gráficas que dan información clara y de sencilla interpretación para ayudarnos a elegir una configuración adecuada. Se ha elegido este software y no el más conocido "Excel" dado que QlickView permite analizar los datos con más libertad, por ejemplo, a la hora de entrar en una tabla, tenemos total libertad para entrar por el campo que deseemos, y a partir de ahí, movernos solo por los campos relacionados con nuestra selección. Esto facilita la posibilidad de hacer infinidad de combinaciones de análisis, empezando cada uno por donde más convenga, pero usando exactamente las mismas tablas. En nuestro caso, estas tablas parecen diseñadas para entrar primero seleccionando una batería, después una hélice y a partir de ahí leer datos para diferentes estados de carga del motor. Sin embargo, nos interesa más entrar en estas tablas eligiendo primero la hélice, ya que tenemos una restricción de tamaño en la que la elección del tamaño de hélice juega un papel muy importante, y a partir de ahí, analizar que batería nos conviene más, y que datos esperamos obtener para nuestro aparato. Este orden de selección, o cualquier otro que nos interese, es perfectamente viable en QlickView.

The voltage (V)	Propeller size	current (A)	thrust (G)	power (W)	efficiency (G/W)	speed (RPM)
11.1	APC11*4.7	1	160	11.1	14.4	2740
		2	260	22.2	11.7	3440
		3	350	33.3	10.5	3930
		4	420	44.4	9.5	4290
		5	510	55.5	9.2	4620
		6	560	66.6	8.4	4840
		7	630	77.7	8.1	5100
		8	680	88.8	7.7	5270
	APC12*3.8	1	170	11.1	15.3	2680
		2	270	22.2	12.2	3300
		3	350	33.3	10.5	3710
		4	440	44.4	9.9	4040
		5	520	55.5	9.4	4280
		6	570	66.6	8.6	4480
		7	640	77.7	8.2	4670
		8	700	88.8	7.9	4880
		9.2	760	102.1	7.4	5000
	APC13*4	1	150	11.1	13.5	2830
		2	260	22.2	11.7	3600
		3	370	33.3	11.1	4210
		4	450	44.4	10.1	4620
		5	530	55.5	9.5	4930
		6.8	670	75.5	8.9	5480
	1340 Carbon fiber Propeller	1	140	11.1	12.6	2430
		2	250	22.2	11.2	3160
		3	340	33.3	10.2	3670
		4	430	44.4	9.6	4050
		5	500	55.5	9	4320
		6	570	66.6	8.6	4600
		7	630	77.7	8.1	4850
		8.2	710	91	7.8	5070
	APC14*4.7	1	160	11.1	14.4	1940
		2	290	22.2	13.1	2530
		3	390	33.3	11.7	2910
		4	450	44.4	10.1	3100
		5	540	55.5	9.7	3340
		6	600	66.6	9	3520
		7	660	77.7	8.5	3670
		8	710	88.8	8	3780
		9	760	99.9	7.6	3860
		10	810	111	7.3	4030
		11	860	122.1	7	4100
		12.1	910	134.3	6.8	4200

Figura 3.6.2.2: Tabla 1 de características ensayadas del motor MT3506.

14.8	APC10*3.8	1	180	14.8	12.2	3630
		2	300	29.6	10.1	4600
		3	400	44.4	9	5130
		4	500	59.2	8.4	5580
		5	570	74	7.7	5930
		6	650	88.8	7.3	6260
		7	720	103.6	6.9	6580
		8	790	118.4	6.7	6810
		9.3	850	137.6	6.2	7040
	APC11*4.7	1	190	14.8	12.8	3010
		2	300	29.6	10.1	3790
		3	420	44.4	9.5	4300
		4	500	59.2	8.4	4670
		5	590	74	8	5040
		6	660	88.8	7.4	5270
		7	730	103.6	7	5510
		8	800	118.4	6.8	5740
		9	860	133.2	6.5	5910
		10	910	148	6.1	6100
		11	960	162.8	5.9	6330
		12.1	1020	179.1	5.7	6440
	APC12*3.8	1	190	14.8	12.8	2900
		2	330	29.6	11.1	3660
		3	440	44.4	9.9	4090
		4	530	59.2	9	4440
		5	600	74	8.1	4680
		6	680	88.8	7.7	4930
		7	760	103.6	7.3	5100
		8	820	118.4	6.9	5280
		9	880	133.2	6.6	5420
		10	930	148	6.3	5580
		11	980	162.8	6	5690
		12	1040	177.6	5.9	5780
		13	1080	192.4	5.6	5870
		13.8	1100	204.2	5.4	5910
	1340 Carbon fiber Propeller	1	170	14.8	11.5	2700
		2	310	29.6	10.5	3540
		3	420	44.4	9.5	4030
		4	510	59.2	8.6	4360
		5	600	74	8.1	4730
		6	660	88.8	7.4	4980
		7	760	103.6	7.3	5210
		8	830	118.4	7	5480
		9	890	133.2	6.7	5620
		10	950	148	6.41	5790
11		1020	162.8	6.2	5940	
12		1090	177.6	6.1	6100	
APC13*4	1	160	14.8	10.8	2950	
	2	310	29.6	10.5	3980	
	3	440	44.4	9.9	4580	
	4	540	59.2	9.1	5050	
	5	640	74	8.6	5430	
	6	730	88.8	8.2	5730	
	7	810	103.6	7.8	6030	
	8	890	118.4	7.5	6270	
	9	960	133.2	7.2	6520	
	10.7	1070	158.4	6.8	6890	

Figura 3.6.2.3: Tabla 2 de características ensayadas para motor MT3506.

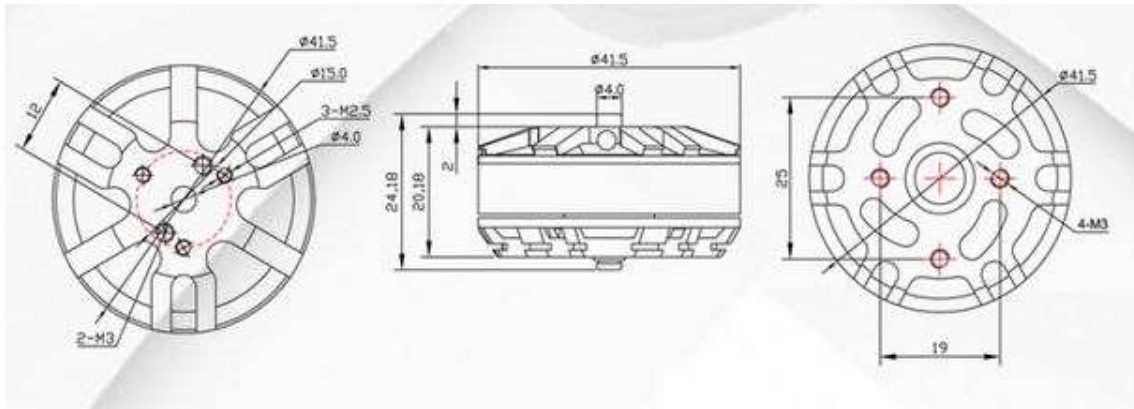


Figura 3.6.2.4: Planos de los motores EMAX MT3506

Veamos cómo podemos usar QlickView para elegir un conjunto de motorización. En la figura 3.6.2.5, vemos como ha quedado el panel de control creado con la información facilitada por el fabricante.

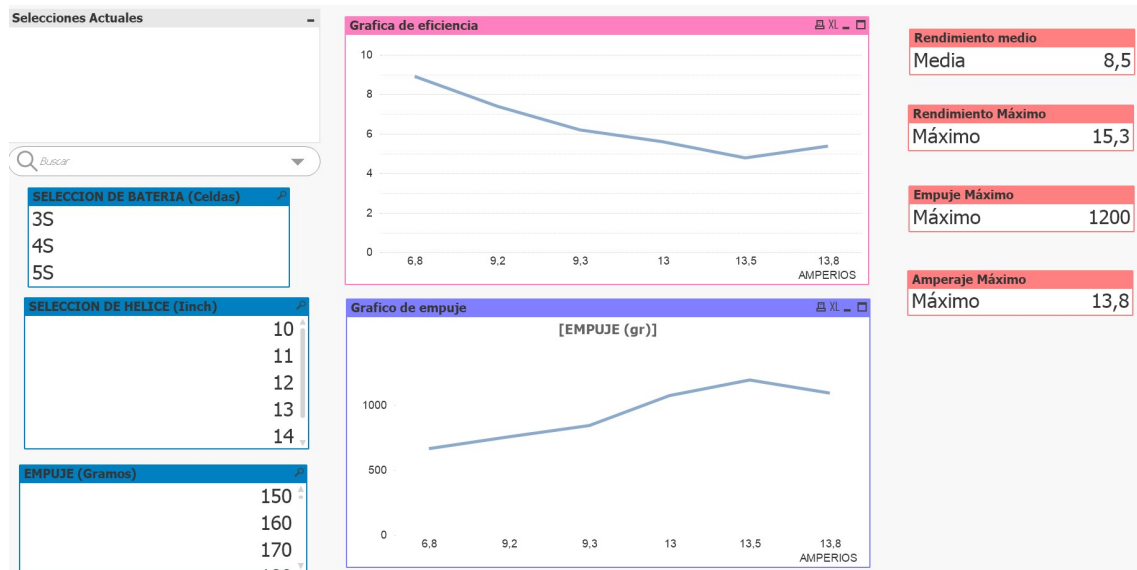


Figura 3.6.2.5: Panel de control sin selecciones.

Ya podemos sacar información general de estos motores, como, por ejemplo, que empuje máximo cabe esperar, o que comportamiento tiene el motor según la carga a la que se somete.

En nuestro caso, buscamos una alta eficiencia, pero un tamaño contenido, si hacemos click en “máxima eficiencia”, el programa solo nos dejara elegir el resto de las selecciones dentro de las configuraciones que den en efecto máxima eficiencia. En la figura 3.6.2.6 podemos ver cómo queda el panel tras hacer esta selección.

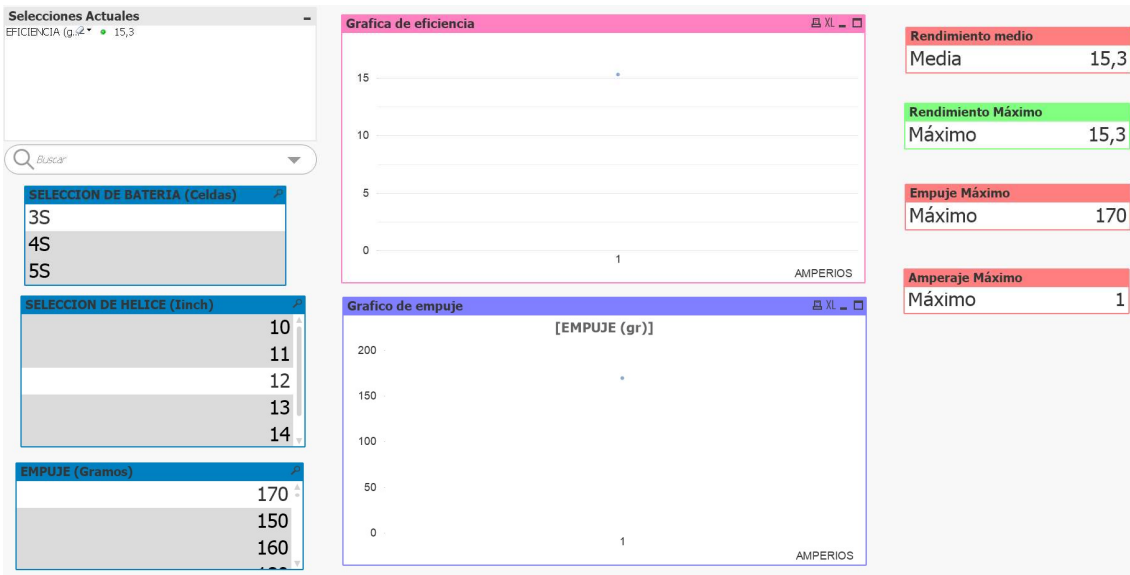


Figura 3.6.2.6: Panel de control con click sobre rendimiento máximo.

Dentro de esta selección, observamos que solo podríamos elegir la batería de 3 celdas, con la hélice de 12", sin embargo, el rendimiento será máximo para un empuje por motor de solo 170gr, insuficiente por completo, y además no sacamos gran información de aquí.

Volviendo al criterio de tamaño, resultaría interesante contener el tamaño de las hélices cuanto más mejor, al entrar en las hélices de 10", obtenemos un empuje insuficiente para lo que buscamos, pero subiendo a 11" obtenemos una configuración muy equilibrada entre empuje y rendimiento, al subir a 12" observamos una mejora en rendimiento y en empuje, pero tan notable como para agrandar tanto el tamaño del dron, pensemos que cada pulgada de diámetro que aumentemos, está aumentando la envergadura del aparato en al menos 5cm.

Por tanto, tras estudiar diferentes configuraciones con ayuda de este programa, nos quedamos con 11" para tamaño de la hélice, y con baterías de 4 celdas. Esta selección nos da el panel de control que podemos ver en la figura 3.6.2.7.

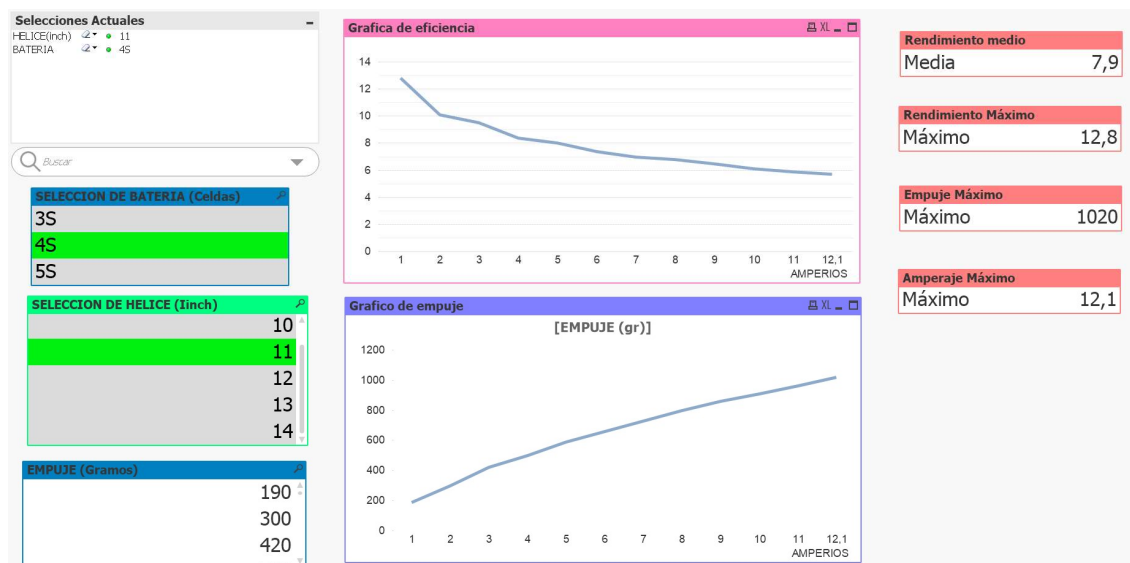


Figura 3.6.2.7: Panel de control para configuración final.

Las hélices, se pueden montar de diferentes materiales y marcas, desde económicos plásticos hasta fibra de carbono. Se han elegido unas palas intermedias de nylon reforzadas con fibra de vidrio del fabricante graupner, ya que en pruebas de campo han demostrado ser las que menos vibraciones producen ya que su nivel de acabado es muy bueno. Podemos ver estas hélices en la figura 3.6.2.8, y también podemos ver el acabado tras el proceso de equilibrado en balanza magnética en la figura 3.6.2.9.

El correcto equilibrado de las hélices es clave para minimizar las vibraciones, recordemos que las vibraciones solo añaden problemas, ya que pueden, desde estropear las imágenes tomadas con el dron hasta inducir fallos catastróficos por hacer imposible el control del aparato o por ayudar a que algunos componentes se desmonten en pleno vuelo, por esto, se elige uno de los métodos de equilibrado más sensibles actualmente, ya que la balanza magnética es aún más sensible que las balanzas tradicionales por rodamientos.



Figura 3.6.2.8: Conjunto de hélices graupner de 11" de diámetro y un paso de 5".



Figura 3.6.2.9: Hélice perfectamente equilibrada en balanza magnética.

Los datos que obtenemos son suficientes para superar las características deseadas, ya que el rendimiento medio es alto, el empuje máximo de 1020gr por motor, teniendo en cuenta una pérdida del 10% por la configuración coaxial, nos da un empuje total de 5,5kg, que no solo es superior a los 4kg que buscábamos, sino que además nos da un margen muy alto por encima de lo requerido. Y, por último, sacamos de aquí también el dato que necesitamos para continuar con el diseño del conjunto de motorización, el amperaje máximo esperado es de 12'1A.

A partir de este dato, buscamos unos ESC válidos, estos, deben permitir un paso de corriente superior a los 12'1A, y, además, los vamos a elegir con firmware "BLheli" pues es el que mejor resultado está dando actualmente y además es actualizable, si es posible, compatibles con "oneshoot 125" pues esto permite que estos ESC puedan responder con mayor rapidez a las señales demandadas por la placa controladora. Con estos criterios, y tratando de mantener un tamaño lo más pequeño posible, los variadores seleccionados son los ZTW de 18A para baterías de 2s a 4s. Podemos ver su aspecto en la figura 3.6.2.10.



Figura 3.6.2.8: ESC ZTW de 18A.

El fabricante proporciona una tabla con las siguientes propiedades para estos ESC, podemos verlos en la tabla 3.6.2.11.

Dimensiones (L*A*A) mm	22x12x4.3
Amperios continuos (A)	18
Amperios maximos (A)	25 (10s)
Salida BEC	No BEC
Tipo de BEC	No BEC
Bateria	5-12NC\2-4Lipo
Peso (g)	1.9g 5.3g (con cables)

Tabla 3.6.2.11: Datos de fabricante para los ESC seleccionados.

Resulta especialmente llamativo el tamaño tan compacto y el peso tan ligero que se ha conseguido para estos variadores, esto se debe, según el fabricante, a la utilización de una nueva generación de transistores N-Mosfets capaces de trabajar con un calentamiento muy inferior a los utilizados anteriormente.

3.6.3-Batería.

La elección de la batería condiciona especialmente la autonomía y la potencia máxima ofrecida por el dron. Ya sabemos del apartado anterior, que vamos a elegir una batería de 4 celdas, pero queda elegir el tipo de celda y la capacidad de la batería.

Existen demasiados tipos de baterías como para tratarlos todos en este texto, pero las que realmente tienen sentido para este tipo de aparatos son las basadas en el "litio", así que, centrándonos en estas, si podemos hablar de varios tipos de baterías de litio que resultan de interés para este proyecto. Todas las baterías de litio tienen un voltaje nominal de 3,7V (aproximadamente), de ahí que, al elegir baterías de 4 celdas, realmente estemos eligiendo el voltaje nominal de la batería. Tipos de baterías que podemos considerar son:

- Litio polímero (Lipo):
Son las más utilizadas para todo tipo de RPAS eléctricos por tener una buena relación peso/capacidad y por ser las baterías que mayor tasa de descarga

tienen, por poner un ejemplo, una batería lipo de solo 300gr nos puede dar sin problemas una corriente de descarga superior a los 100A. Lo cual suele cubrir sobradamente las necesidades de cualquier RPAS. Además, el rápido desarrollo de la tecnología de estas baterías ha permitido abaratarlas mucho, con lo cual cada vez ocupan un lugar en el mercado más privilegiado. Los datos más relevantes y generales que podemos incluir en esta categoría son, relaciones de capacidad/peso que oscilan entre los 150Wh/Kg y los 230Wh/kg, con corrientes de descarga muy superiores a los 100A. Su principal desventaja es que son altamente explosivas y se deterioran con facilidad si no se respetan unas rigurosas instrucciones de uso y mantenimiento. Las celdas de estas baterías suelen construirse con un diseño en láminas, podemos ver el aspecto de estas láminas en la figura 3.6.3.1.



Figura 3.6.3.1: Celda de batería Lipo.

- Litio ion (li ion):

Son las que encontramos en los teléfonos móviles y en multitud de aparatos electrónicos, estas, al contrario que las lipo, son muy seguras y no requieren apenas consideraciones de mantenimiento, además son más ligeras que las lipo, con lo cual, podemos esperar de ellas relaciones de capacidad/peso superiores a los 250Wh/Kg, algo muy destacable para obtener largas autonomías. Por el contrario, estas baterías no permiten altas corrientes de descarga, lo cual las suele dejar fuera de proyectos que requieran altas potencias. Las celdas de estas baterías las podemos encontrar tanto en diseño de láminas como en forma cilíndrica, pero las destinadas a RPAS habitualmente son cilíndricas, podemos ver un ejemplo en la figura 3.6.3.2.



Figura 3.6.3.2: Celda de batería Li ion.

- Litio nano fosfato (LiFePo4):

Son las baterías desarrolladas para los vehículos eléctricos, por citar un ejemplo, los coches del fabricante “Tesla” usan estas baterías. Sus cualidades más destacables son, su altísima seguridad, su nula necesidad de cuidado y mantenimiento, sus altas tasas de descarga y, sobre todo, su gran vida útil. Estas baterías, sin requerimientos exigentes para su uso tanto en carga como en descarga, mantienen una capacidad superior al 85% incluso después de 1000 ciclos. Esto las hace realmente únicas, pues las demás no podrían mantener estas propiedades ni para la mitad de ciclos. Sus corrientes de descarga con similares a los de las baterías lipo, y, su principal desventaja es su baja relación capacidad/peso, inferior a 110Wh/Kg. Estas baterías en la inmensa mayoría de los casos se fabrican en celdas cilíndricas, como las que podemos ver en la figura 3.6.3.3.



Figura 3.6.3.3: Celda de batería LiFePo4

En nuestro caso, al haber conseguido unos consumos eléctricos tan bajos, podríamos plantearnos usar tecnología Litio ion para obtener una autonomía máxima, sin embargo, el coste más elevado de estas baterías ha sido decisivo para rechazarlas. En cuanto a las LiFePo4, teniendo en cuenta su inferior capacidad, quedan fuera del proyecto también, por tanto, nos quedamos con las baterías LiPo. De todas formas, dentro de las LiPo, hay multitud de tipos de baterías, para elegir la más adecuada, vamos a hacer un repaso de las características principales de una batería:

- Voltaje nominal: Dependerá del número de celdas colocadas en serie, en nuestro caso 4, tendremos un voltaje nominal de 14´8V.
- Capacidad: dependerá del tamaño de las celdas y el número de estas colocadas en paralelo. Mas adelante se determinará la capacidad adecuada de nuestras baterías.
- Corriente máxima de descarga: Esta viene dada por el número de “C” detallado en las especificaciones, y este a su vez está referido a la capacidad de la batería, por ejemplo, una batería de “20C” que tenga

una capacidad de “3000mah” tendrá una corriente máxima de descarga de $3000 \cdot 20 = 60000 \text{ma}$, es decir, 60 amperios en continuo. Lo habitual, es que estas puedan ofrecer hasta el doble de descarga en situaciones pico, En nuestro caso, necesitamos superar la cantidad de $12,1 \cdot 6 = 72,6$ amperios de pico, ya que cada motor puede llegar a 12,1A y son 6 motores en total. Sin embargo, en descarga continua, necesitamos mucho menos, pues podemos estimar un consumo continuo inferior a los 20A, usando el programa que vimos en el apartado de motorización.

Con ayuda del panel de control creado para los motores elegidos, y tras el estudio de varios casos, vemos que el consumo continuo aproximado del aparato estará en torno a los 15A. Con este dato, y teniendo en cuenta que queremos una autonomía superior a los 10 minutos, debemos buscar baterías de más de 2500mAh. Tras estudiar varias opciones, se eligen unas baterías de 4000mah y 10C de descarga continua y 20C de descarga de pico. Se han elegido con tan bajo valor de C porque gracias a esto, la densidad de carga obtenida es más alta, tengamos en cuenta, que las baterías con altas tasas de descarga, rara vez superan los 150Wh/kg de densidad de carga, sin embargo, la batería elegida, con un peso de solo 345gr, llega a los 176Wh/kg. Esto se ha podido hacer gracias a que los consumos esperados son muy bajos. Los requerimientos de potencia se cumplen, aunque en el caso de consumo de pico, no sobradamente, pues podemos llegar a los 72,6A y tenemos un límite de 80A. En consumo continuo si se cumplen con amplia holgura, pues de los 15A que esperamos consumir podemos subir hasta los 40A antes de saturar la batería. Podemos ver una imagen de la batería elegida en la figura 3.6.3.4.



Figura 3.6.3.4: Batería LiPo escogida.

3.6.4-Señal de radio.

A través del sistema de radio es como le damos ordenes al dron, tanto para el control manual como el asistido. Los dos parámetros críticos a la hora de elegir este sistema son: el número de canales, y el alcance que esperamos que tenga. Tengamos en cuenta, que, para manejar nuestro sistema de control, necesitamos al menos 6 canales, estos se corresponden con: Potencia, cabeceo, alabeo y giñada para el control manual, más un selector de modo de asistencia, más un canal auxiliar para vuelos inteligentes. Por tanto,

nuestra radio debe tener 6 o más canales. Nos interesa tener más de 6, ya que así podemos controlar también sistemas auxiliares, como puede ser el control de la inclinación de una cámara, o el control de un sistema de liberación de carga de pago. Por tanto, vamos a buscar una radio de 8 canales, para que nos sobren dos para controlar sistemas opcionales ajenos al sistema de control. En cuanto al alcance, la mayoría de las radios actuales son digitales, de 2´4ghz de frecuencia, y, con esta tecnología, el alcance suele estar entre los 800 y los 1500 metros. En principio, como ya se comentó anteriormente, sería suficiente con este alcance, pero, sería interesante poder ampliar el alcance del aparato en caso de ser necesario. Por eso, se elige un equipo de radio modular, el cual, tiene su módulo de transmisión externo a la propia radio y a su sistema de programación, así, solo hay que programar la radio una vez, y esta programación nos valdrá en el comienzo para el módulo estándar de 2´4ghz, pero, más adelante, también valdrá para un módulo de largo alcance UHF.

Un modelo capaz de hacer esto y con un valor económico bastante bajo es el “turnigy 9XR pro” (ver figura 3.6.4.1). cuyo es algo inferior a los 100€ (año 2017). El módulo de 2´4ghz con el que empezamos se puede ver en la figura 3.6.4.2 y tiene un coste aproximado de 40€ (año 2017). Una vez que queramos ampliar el alcance de la radio, solo habría que acoplarle el módulo UHF, que podemos ver en la figura 3.6.4.3, cuyo coste oscila los 150€ (año 2017), el elevado coste de este módulo explica el porqué empezamos con uno de 2´4ghz, mucho más económico.



Figura 3.6.4.1: Transmisor de radio Turnigy 9XR pro



Figura 3.6.4.2: Modulo transmisor de 2´4ghz



Figura 3.6.4.3: Modulo transmisor UHF de largo alcance.

En cuanto a los receptores, también de estos depende mucho el alcance, básicamente, si elegimos receptores de tamaño normal, este tendrá el alcance completo del orden del que comentábamos cuando hablamos de los transmisores, sin embargo, si se eligen receptores de tamaño reducido, estos tendrán un alcance del orden de los 500 metros. En nuestro caso, aunque el peso y el espacio se está tratando de optimizar en todos los sistemas, nos quedaremos con el receptor de tamaño completo, ya que no podemos perder tanto rango de alcance. Por otra parte, al elegir el receptor, debemos tener muy en cuenta el protocolo de transmisión de datos con el que este trabaja. Los tres protocolos más extendidos son: PWM, PPM y S-BUS. Las características de estos son:

- PWM: Es el más antiguo, la señal es analógica y se transmite cada canal por un cableado distinto, esto hace que, si nuestro sistema es de muchos canales, el montaje en PWM suele resultar engorroso por la gran cantidad de cables.
- PPM: Es más moderno que el PWM, en este protocolo, también analógico, tenemos un solo cableado para todos los canales, resulta muy interesante para ahorrar en cableado, y además es especialmente útil cuando solo queremos comunicar el receptor con un único sistema.

- S-BUS: Es el más moderno y el que presenta más ventajas, además de tener todos los canales en un solo cableado, al igual que el PPM, este transmite la información digitalizada, por lo que se eliminan problemas de ruido. Además, para este protocolo, se ha optimizado mucho la latencia, con lo cual es el que menos retraso tiene de todos.

En nuestro caso, tenemos intención de alimentar varios sistemas por separado, por lo que nos quedaremos con el protocolo PWM, que, aunque sea más engorroso de configurar y más antiguo, es que más versatilidad nos da para comunicarnos a la vez con varios sistemas diferentes. Concretamente, el receptor elegido para nuestro dron es el FR-SKY D8R II Plus, ya que tiene las salidas en PWM y además cuenta con la opción de añadir telemetría en doble sentido, opción que podría ser interesante aprovechar en el futuro. Por último, cabe destacar de este receptor también que, gracias a su antena doble, obtiene un resultado en alcance incluso superior a los 1500 metros. Podemos ver el aspecto de este receptor en la figura 3.6.4.4.



Figura 3.6.4.4: Receptor FR SKY D8R II plus.

3.6.5-Transmisión de video e información.

Resulta muy útil poder ver, en tiempo real, una transmisión de video que nos permita pilotar el aparato como si estuviéramos dentro, a esto se le suele llamar FPV, del inglés “first person view”. Para esto, dependiendo de nuestras preferencias, elegimos un sistema u otro. Simplificando un poco, nos podemos quedar con dos opciones básicamente, o bien buscamos mucha calidad en la imagen transmitida, pero aceptamos cierto retraso, o bien, buscamos una imagen con prácticamente nulo retraso, para poder pilotar más rápido y con reacciones más exactas. Esta elección nos dicta si vamos a elegir un sistema digital, en el caso de que queramos calidad, o un sistema analógico, en caso de que queramos retraso despreciable. Para este proyecto, se ha considerado más útil poder pilotar con un retraso casi nulo, ya que el video con alta calidad puede grabarse con una cámara independiente y examinarlo después del vuelo. De forma que nos quedamos con un sistema analógico para la transmisión de video en directo y otro digital para la grabación. La diferencia cuantificable que hay entre estos dos sistemas es, un retraso de más de 100ms para el sistema digital, contra un retraso inferior a 20ms en el analógico, y una transmisión de video de hasta 1080p a 60fps en la transmisión digital,

contra una imagen de 520 líneas en el sistema analógico que, además, suele tener problemas de ruido. Cabe destacar también, que la diferencia de precio es realmente alta, así, un sistema completo de toma de video, transmisión y recepción de la imagen, en analógico tiene un coste inferior a los 100€ (año 2017), y, sin embargo, un sistema equivalente en digital, que permita las calidades antes mencionadas, supera fácilmente los 1500€. El sistema elegido finalmente consta de:

- Cámara 700TVL sensor sony de objetivo intercambiable y reducidas dimensiones (21x36x30mm 15gr) podemos verla en la figura 3.6.5.1.



Figura 3.6.5.1: cámara FPV.

- Objetivo de gran angular para abarcar más campo de visión (170 grados), podemos verlo en la figura 3.6.5.2.



Figura 3.6.5.2: Objetivo de gran angular.

- Transmisor de video de 5.8ghz y 600mw muy compacto (38x18x8mm 16gr) Podemos verlo en la figura 3.6.5.3.



Figura 3.6.5.3: Transmisor de video.

- Antena de polarización circular omnidireccional, figura 3.6.5.4.



Figura 3.6.5.4: Antena de polarización circular omnidireccional.

- Monitor de 4,3" con receptor de 5.8ghz integrado, también con antena de polarización circular omnidireccional. Figura 3.6.5.5.



Figura 3.6.5.5: Sistema de recepción y visualización de video.

La elección de una cámara con objetivo intercambiable no solo nos permite elegir el ángulo de visión, como se ha hecho, además, permite que las reparaciones sean menos costosas, puesto que el objetivo es lo que más se rompe, y así, podemos sustituirlo sin tener que costear una cámara completa. Al elegir un objetivo de gran angular, tenemos un amplio campo de visión que nos permite pilotar de forma de forma cómoda, sin la sensación de visión de túnel que tendríamos con objetivos más cerrados. Por otra parte, el transmisor de 600mw permite transferencia de video a larga distancia (del orden de los 1000m) manteniendo un tamaño muy compacto, no obstante, para posibles ampliaciones de alcance, se considera también la opción de sustituir este módulo por

uno de 1000mw diseñado para muy largo alcance, eso si, sacrificando completamente el bajo peso y las reducidas dimensiones. La justificación de elegir una antena de polarización circular viene porque las antenas tradicionales de polarización lineal son muy baratas y bastante eficientes cuando tanto el emisor como el receptor están situados en posiciones fijas y esto nos permite orientar las antenas paralelas una a otra, asegurando una calidad de recepción muy alta. Sin embargo, al tener en nuestro caso, tanto emisor como receptor en continuo movimiento, no es posible en absoluto asegurar una correcta orientación de la antena en cada momento, lo cual nos daría continuas pérdidas de calidad de señal por mala orientación. Este problema se soluciona con las antenas de polarización circular, las cuales no necesitan ninguna orientación relativa para transmitir con calidad, y aunque su precio sea un poco más elevado, su amplio uso en el campo de los RPAS está dando lugar cada vez a más competencia entre fabricantes y esto está influyendo considerablemente en la bajada de precios. Por último, la elección de un monitor en vez de unas gafas de realidad virtual se basa en la rapidez con la que podemos cambiar de vuelo en primera persona a vuelo en tercera persona usando un monitor, aunque sacrificamos la alta capacidad de inmersión que ofrecen unas gafas. Además, el monitor es mucho más compacto, facilitando el transporte del sistema completo.

Una vez tenemos el sistema de video completo, es interesante aprovecharlo para recibir información útil del aparato, hablamos de sistemas OSD (on screen display), similares a los conocidos HUD (head up display) de las aeronaves pilotadas convencionales. Estos sistemas, permiten conocer datos como velocidad, altura, posición, consumo energético, estado de la batería, y multitud de datos más, integrándolas en la señal de video. De entre todos los datos que puede mostrar este sistema, se ha elegido únicamente tener en cuenta datos relacionados con la batería, pues a la hora de volar el dron, han sido los únicos datos consultados con interés real para la mejor explotación del aparato, y hay que tener en cuenta que cuanto más información, peor veremos la imagen y más engorroso será de interpretar. Para ilustrar esto, vemos lo que muestra un sistema OSD muy completo en la figura 3.6.5.6 y el sistema elegido en la figura 3.6.5.7.

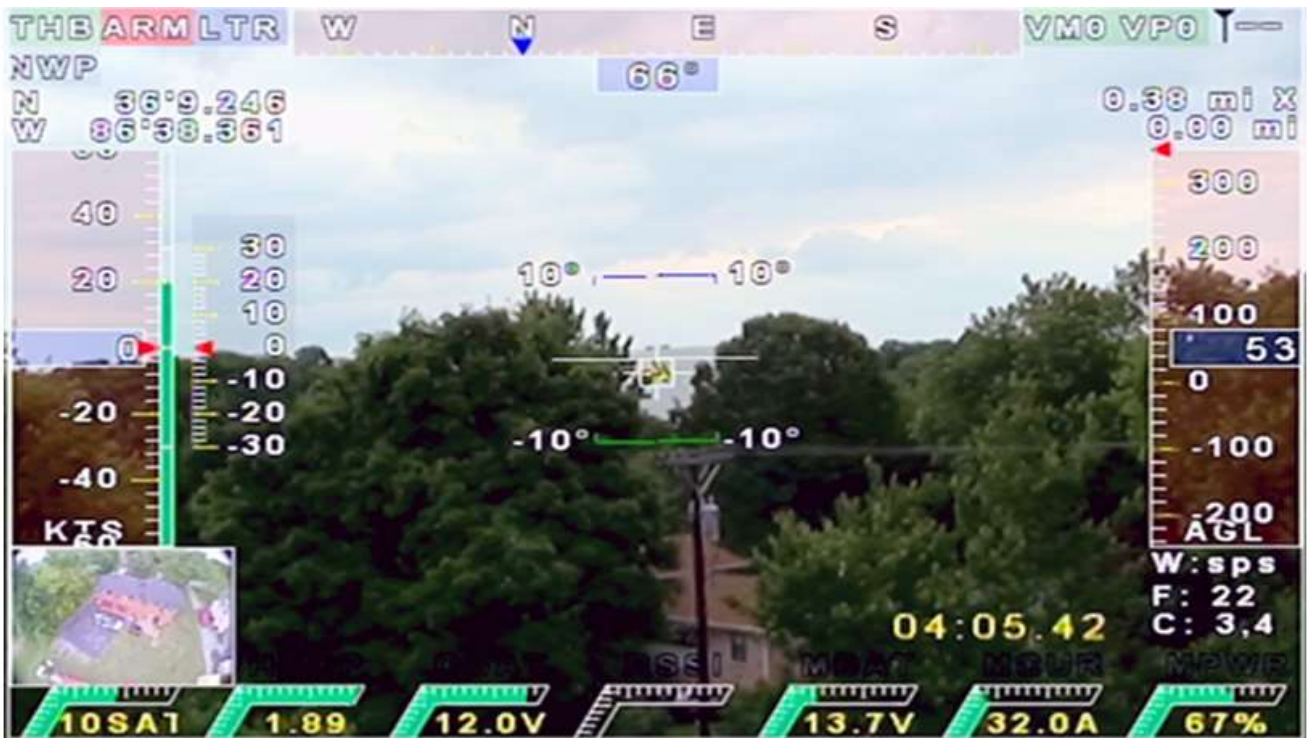


Figura 3.6.5.6: vista de Información excesiva en sistema OSD.



Figura 3.6.5.7: Sistema simple de OSD con información de batería.

En nuestro sistema, podemos comprobar rápidamente la información más relevante sobre la batería, sin llenar la pantalla de datos que, en la práctica, no han demostrado ser especialmente útiles, no obstante, si en un futuro se planteara la necesidad de ampliar la información en pantalla, es sencillo y barato sustituir el módulo OSD por otro más completo. En nuestro caso, este sistema de información se puede integrar en la placa de distribución de potencia del aparato, lo cual permite una integración realmente compacta y sencilla.

El aspecto de esta placa podemos verlo en la figura 3.6.5.8, y su esquema de conexiones en la figura 3.6.5.9, como podemos apreciar, es sencillo y compacto.



Figura 3.6.5.8: Placa de distribución de potencia con sistema OSD integrado.

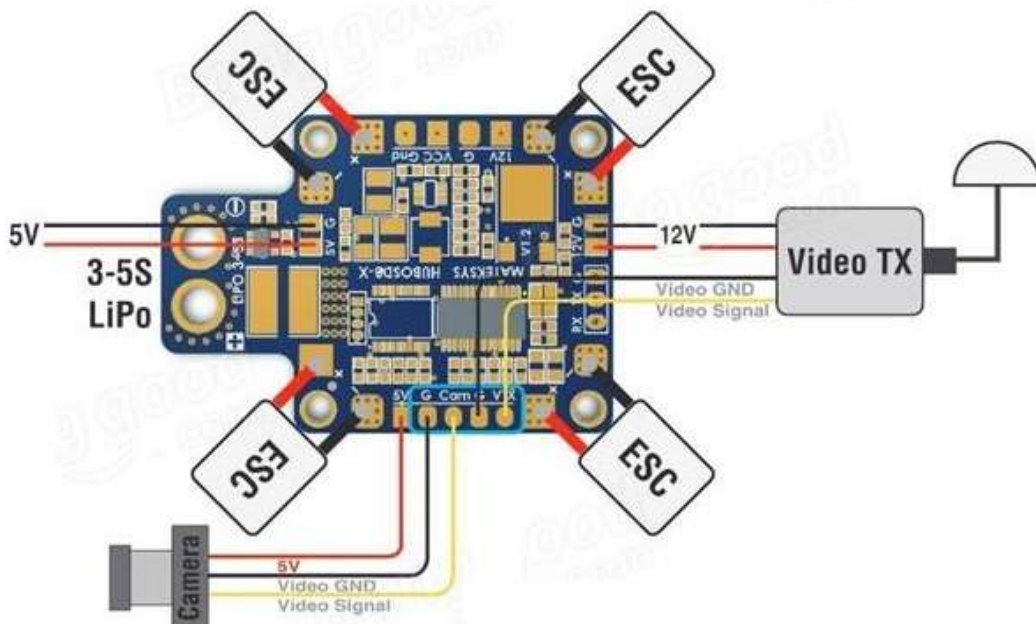


Figura 3.6.5.9: Esquema de conexión del sistema OSD.

3.7-Componentes opcionales.

Existen un sinnúmero de componentes adicionales para este tipo de aparatos, pero en este apartado, vamos a destacar dos de ellos, que resultan especialmente interesantes en determinadas circunstancias. El primero de ellos es un tren de aterrizaje de 3 puntos con sistema de amortiguación. Y, el segundo, un gimbal con estabilización en dos ejes.

El primero, normalmente no es necesario, dada la robustez de los multicopteros por sus escasas piezas móviles, es frecuente prescindir de un tren de aterrizaje como tal, ya que se ahorra peso al eliminarlo, y se puede recuperar el aparato dejándolo caer simplemente en una pequeña superficie acolchada. Sin embargo, puede resultar útil contar con un tren como el descrito, si la carga de pago es elevada o sensible a impactos, por eso, dentro de los componentes opcionales, se ha diseñado un sistema de tren de aterrizaje, que, al ser de tres puntos, permite aterrizar en superficies abruptas, y al ser amortiguado, absorbe parte de la energía de impacto generada al aterrizar, evitando que esta llegue a una carga de pago sensible. El aspecto final de este componente, podemos verlo en la figura 3.7.1.



Figura 3.7.1: Tren de aterrizaje amortiguado de 3 puntos de apoyo.

En la fase inicial de diseño, se intentó que este componente fuera retráctil, lo cual compactaría el tamaño del aparato para su transporte, y, además, permitiría que el tren no interfiriera con los equipos de la carga de pago, ya que, por ejemplo, si estamos haciendo un video con la cámara apuntando hacia abajo, es fácil que el tren interfiriera en la imagen, algo que generalmente, estropea el resultado buscado. En este intento de hacer el sistema retráctil, hubo varias complicaciones, la primera, el peso, inevitablemente, la introducción de un sistema retráctil aumenta el peso del aparato, una variable muy crítica en nuestro caso. Por otra parte, en las pruebas de campo, los

sistemas retractiles demostraron ser frágiles, y poco estables, por tanto, tras varios intentos, se rechazó la idea de hacer este componente retráctil.

En cuanto al gimbal, es un componente que resulta muy útil para obtener videos estabilizados, ya sean de imágenes convencionales o termográficas, ya que con este componente podemos aislar completamente los movimientos del dron de cabeceo y alabeo, que son los que más pueden afectar al video que queramos tomar. Este sistema, consta de una unidad inercial instalada con movimiento solidario a la cámara, un ordenador que analiza los datos de la unidad inercial, y dos motores brushles conectados al ordenador que se mueven de forma que anulen los efectos de cabeceo y alabeo del aparato. El resultado es realmente eficaz, de forma que cuando observamos un video tomado con gimbal, la sensación que transmite es que está siendo tomado desde un punto fijo, independientemente de los movimientos del aparato. El aspecto de este sistema, podemos verlo, acoplado a una cámara GoPro en la figura 3.7.2.



Figura 3.7.2: sistema completo de gimbal con cámara GoPro.

3.8-Proceso de diseño y fabricación.

Una vez elegidos los materiales y componentes que van a formar parte del proyecto, para la fabricación, se siguió un proceso de fabricación concurrente, en el que diseño y fabricación van avanzando de forma simultánea e íntimamente relacionadas. Primero se hicieron planos muy sencillos en 2D, con ayuda del software SmartSketch, muy sencillo de usar. Con ayuda de estos planos, impresos en papel se fabrican piezas a escala 1:1 de una maqueta en materiales baratos y fáciles de manipular como aluminio y madera, con esta maqueta, se comprueban las diferentes combinaciones posibles para la colocación de los componentes, así como la facilidad de montaje y desmontaje tanto del chasis como de los componentes. De esta forma, surgen multitud de modificaciones, algunas pueden aplicarse directamente en la maqueta, y otras requieren la construcción de otra maqueta. Así, el diseño del chasis avanza en la dirección de ser práctico y sencillo al uso, y tras varias iteraciones en este proceso, se puede llegar a un chasis final, que ya si, se puede fabricar en el material definitivo, la fibra de carbono. En la figura 3.8.1, podemos ver la sencillez de los planos utilizados para este propósito inicial. En esta, vemos el diseño completo del chasis, en 2D, de donde podemos sacar los recortables para cada pieza implicada, y fabricar todos los componentes.

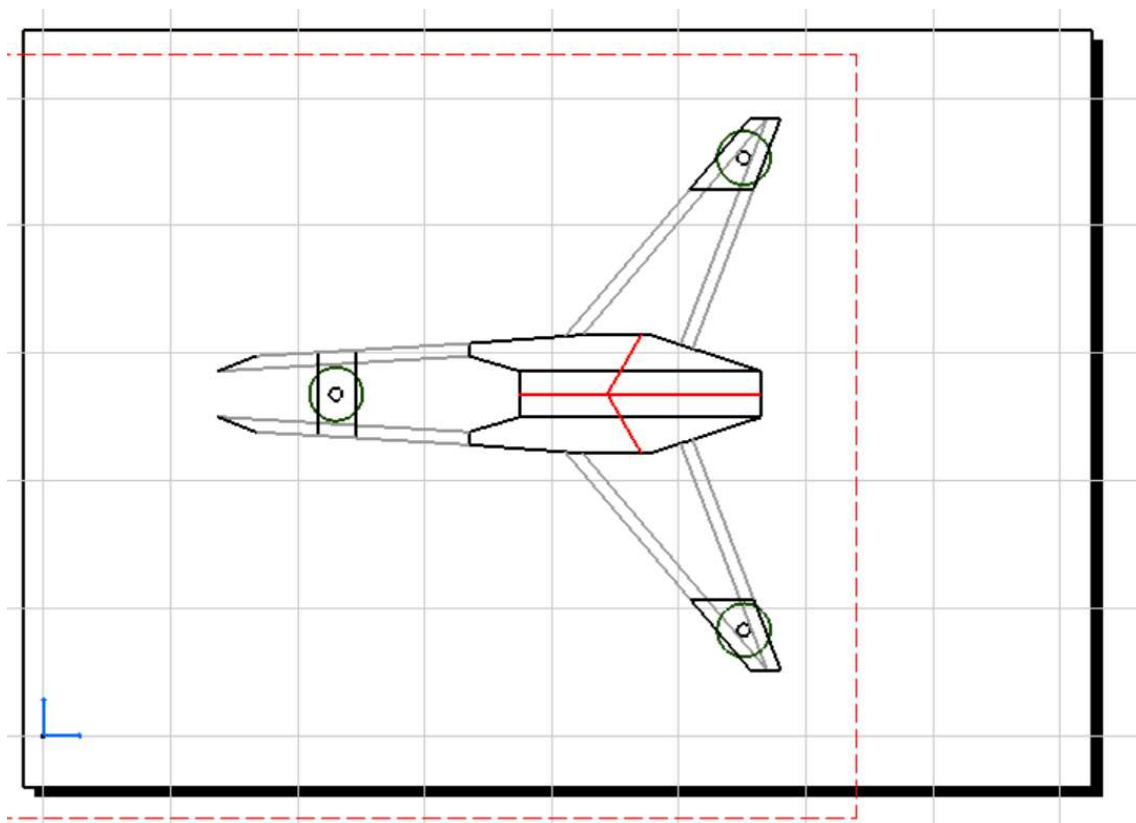


Figura 3.8.1: Plano sencillo en 2D para chasis.

En las figuras 3.8.2, 3.8.3, y 3.8.4 podemos ver el aspecto de la maqueta de madera y aluminio, primero, en dos pruebas diferentes de colocación de accesorios y tamaños. Y,

Finalmente, como quedaron todos estos componentes integrados listos para el modelo real. En la 3.8.2 podemos ver como se estudia la colocación del gimbal, para que este no interfiera con las hélices, y para estudiar su efecto sobre la posición real del centro de gravedad.



Figura 3.8.2: Pruebas de colocación de gimbal en maqueta de chasis.

En la 3.8.3 se está diseñando el tren de aterrizaje amortiguado para que no interfiera con las hélices y ofrezca una buena superficie de apoyo que garantice la estabilidad del aterrizaje.



Figura 3.8.3: Pruebas del tren de aterrizaje sobre la maqueta del chasis.

Y, ya, por último, en la 3.8.4, vemos el diseño definitivo tanto de estos componentes como del chasis, que desde el inicio de diseño, ha sufrido modificaciones simples tales

como, cambio de posiciones de taladros, o reducción o ampliación de tamaño de piezas, Necesarios para la perfecta integración de componentes.

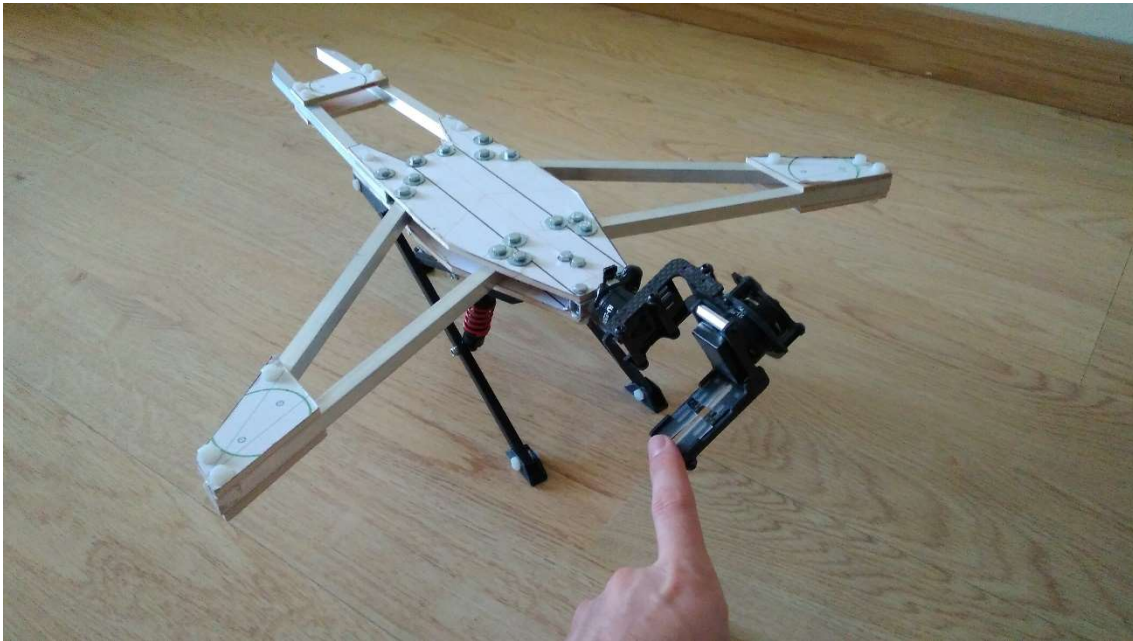


Figura 3.8.4: Maqueta del chasis final con gimbal y tren colocados en configuración real.

Llegado a este punto, ya tenemos las dimensiones finales para el chasis, es el momento de fabricar el chasis real de fibra de carbono, para esto, se procede de manera similar al chasis de la maqueta. Imprimimos los recortables, los pegamos a las planchas y listones y cortamos y lijamos hasta conseguir las piezas deseadas. Es importante no hacer aun ningún taladro, hasta que no tengamos todas las piezas. Pues, como ya se adelantó al hablar de la fabricación artesanal, los taladros se hacen sobre la estructura montada provisionalmente con cinta adhesiva de doble cara, asegurando así el perfecto encaje de las piezas con la tornillería, independientemente de la precisión con la que se hagan los taladros. El acabado del chasis antes de taladrar, con sus recortables aun pegados, y ya con todas las piezas unidas con adhesivo de doble cara, puede verse en la figura 3.8.5.

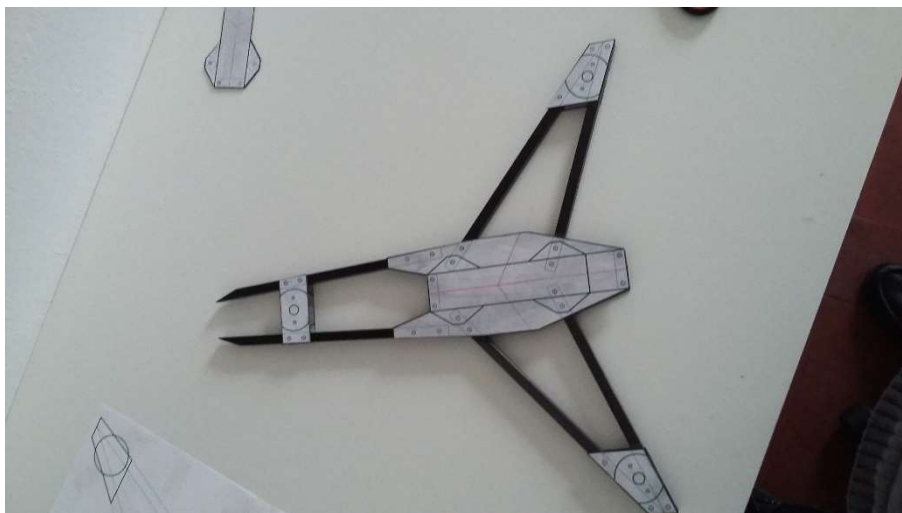


Figura 3.8.5: Chasis preparado para taladrar.

Una vez realizados los taladros, se desmonta el chasis, se retiran los adhesivos de doble cara y se atornilla adecuadamente con la tornillería de nylon, tras atornillar, los salientes de los tornillos se pueden recortar fácilmente con un alicate para cortar cables. El acabado final del chasis atornillado queda tal como se ve en la figura 3.8.6, en la cual, además, se está realizando el pesaje del chasis.

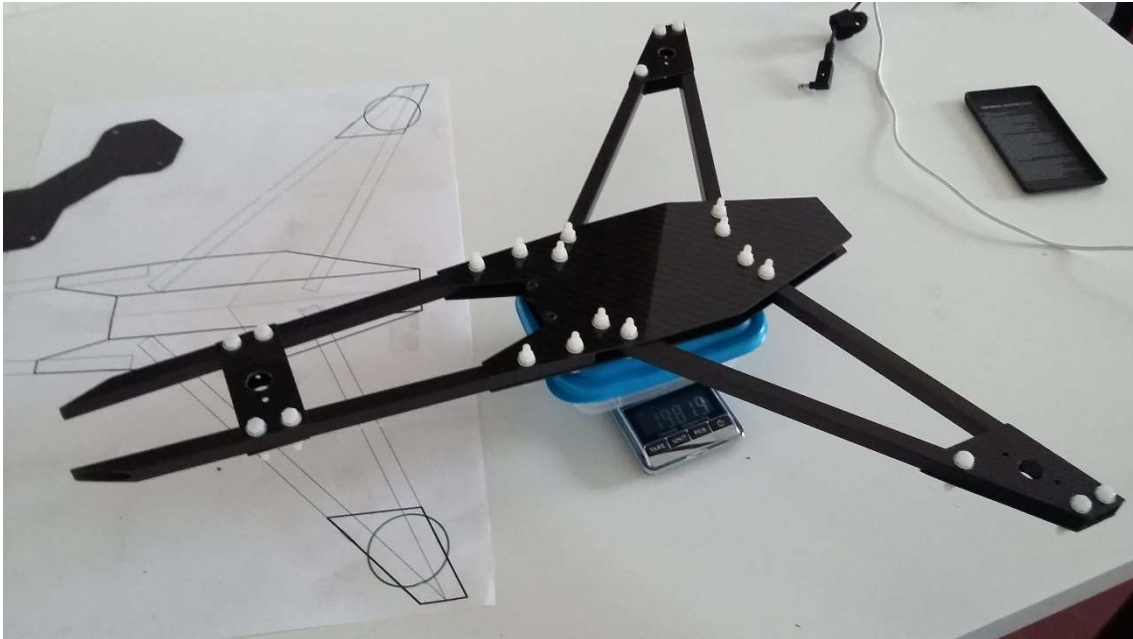


Figura 3.8.6: Pesaje del chasis completo con tornillería incluida.

Podemos ver, que el chasis al completo pesa menos de 200gr, esto es un peso realmente bajo, como referencia, los chasis para drones de una envergadura de aproximadamente la mitad que este, destinados a carreras pesan aproximadamente 150gr, y, un chasis de fibra de carbono comercial para un dron idéntico al de este proyecto, como podría ser el del modelo reptile Y400, tiene un peso de 510gr. Podemos ver el chasis del reptile Y400 en la figura 3.8.7.



Figura 3.8.7: Chasis comercial reptile Y400.

Podemos atribuir esta diferencia de peso a varios factores, fundamentalmente, la elección de tornillería de nylon contra la de acero, el uso de perfiles cuadrados contra los redondos, y el poco uso de accesorios estéticos. El uso de perfiles cuadrados permite el atornillado directo entre los perfiles y las planchas planas, eliminando piezas intermedias mecanizadas en aluminio, y por tanto eliminando peso. Además, el uso de brazos dobles de perfil cuadrado otorga una resistencia a torsión excepcional a estos aparatos, y elimina la posibilidad de que las bancadas de los motores queden con un ángulo de incidencia que introduzca una componente de empuje parasita que obligue a trabajar a la placa de control en correcciones innecesarias. Podemos apreciar también, en la figura 3.8.6, el característico acabado en pico de la cola, más larga que los brazos laterales. Con este diseño, podemos mantener los motores en una posición de triángulo equilátero, pero como esta alta simetría puede ocasionar confusión en vuelo en cuanto a donde está situado el morro del dron, al tener la cola una clara prolongación, nos ayuda a situar la orientación relativa del aparato en vuelo, además, llegada la necesidad de compensar cargas de pago delanteras, podríamos situar algún componente eléctrico en la cola para reequilibrar el centro de gravedad. Por ejemplo, esto ha resultado útil cuando se ha volado con un gimbal en el morro, pues este puede desplazar el centro de gravedad hacia adelante hasta en 3cm, y situando en la cola elementos fácilmente desplazables como el receptor, o el transmisor de video, podemos reducir la excentricidad del nuevo centro de gravedad, ayudando a que la placa no tenga que sobrecargar los motores delanteros para mantener el equilibrio estático del aparato.

Ahora que ya tenemos el chasis completo, colocamos primero los elementos de la motorización, pues estos no sufrirán apenas modificaciones, no podemos decir lo mismo del resto de componentes, pues se van resituando continuamente por su facilidad y permisibilidad a la hora de elegir una nueva ubicación. El acabado del aparato con los elementos de motorización instalados tiene el aspecto que podemos apreciar en la figura 3.8.8.



Figura 3.8.8: Chasis con motorización montada.

Una vez instalados más componentes fundamentales, como las hélices y parte de la electrónica, el dron cobra el aspecto que vemos en la figura 3.8.9.



Figura 3.8.9: Dron en fase de finalización de fabricación.

A partir de aquí, solo hace falta colocar algunos accesorios y programar toda la electrónica. Para culminar la fabricación del aparato, se realizó un modelo en 3D del aparato, sobre el que se han probado diferentes configuraciones y sobre el que se han podido fabricar por impresión 3D varias piezas que facilitan considerablemente el montaje final del aparato. Por esta razón, damos paso al capítulo siguiente, en el que vamos a ver el modelo en 3D, y las aplicaciones que se han dado a este modelo para llegar al producto final.

4-Modelo en Catia V5

4.1-Catia como software de modelado.

Existen multitud de softwares para el diseño y modelado 3D, el hecho de elegir Catia V5 se basa fundamentalmente en el lazo tan estrecho que tiene este software con el sector aeronáutico, ya que, la empresa propietaria de Catia, Dassault systems, trabaja con Airbus de manera continua en optimizar este software para el diseño de aeronaves. Esto se hace muy notable, no solo en la multitud de opciones que tiene el programa y en su notable capacidad de crear superficies complejas, si no también, en que es un programa en el cual realizar modificaciones y actualizaciones es especialmente cómodo, ya que en este programa, los elementos geométricos no están “muertos” en sus posiciones de diseño, estos, están enlazados con los elementos de su entorno, de manera que si se hace una modificación en un elemento, los demás se ajustan automáticamente a esta modificación. Esto es realmente útil en proyectos en continuo desarrollo, ya que se estima que, en cada proyecto aeronáutico, se invierte hasta 4 veces mas tiempo en realizar modificaciones del que se invierte en el diseño inicial. Igualmente, este proyecto, no solo es de una aeronave, si no que esta en continuo desarrollo y se aplican cambios y mejoras continuamente, por eso, el hecho de que este programa este optimizado para asimilar con facilidad cambios continuos, ha sido el factor determinante para ser elegido por encima de los competidores.

4.2-Metodología y designación de piezas y conjuntos.

Para el modelado del dron en cuestión, se han tratado de respetar las directrices que marca Airbus para el diseño de aeronaves, ya que esto facilita mucho el poder extraer todo el potencial de Catia a la hora de aplicar cambios en los modelos. Primero, tratamos de tener el árbol del programa perfectamente ordenado y estructurado de forma que no sea engorroso llegar al elemento que queremos modificar, también, debemos poner mucha atención en las relaciones que establezcamos entre los diferentes elementos geométricos, para asegurarnos de que futuras modificaciones no vayan a producir incongruencias. Para piezas de geometrías relativamente complejas, hay dos formas diferentes de proceder, podemos hacerlas de un solo cuerpo, aplicando muchas operaciones a este, o bien, unir varios cuerpos sencillos para formar el complejo, de forma que cada cuerpo sencillo requiera pocas operaciones y lo mas simple posible, en este proyecto, se trabajara siempre de la segunda manera, pues también así facilitamos las actualizaciones futuras. Otra directriz mas a seguir, es el uso de operaciones booleanas para retirar material, de forma que no se hace uso del botón “pocket”, en vez de esto, creamos un “body” con la forma del hueco que queremos crear, y después aplicamos la operación booleana “remove”. De esta forma es mas fácil después aplicar cambios a esta retirada de material y favorecemos la creación de cuerpos formados por otros cuerpos más simples.

En cuanto a la designación, se ha tratado de imitar también la forma de trabajar de Airbus, así, cada pieza, tendrá un nombre en forma de código que empieza por el nombre del proyecto global, seguido de una numeración que explicamos con unos ejemplos.

Ejemplo 1: La pieza DRONEY6.05.104.01 es un listón trasero, donde DRONEY6.05 es el nombre común de todas las partes que componen el modelo completo, DRONEY6 por ser un dron en configuración Y6 y el 05 por ser el quinto dron fabricado con esta configuración. 104 es el número correspondiente a la pieza, la serie 1XX es para piezas de fibra de carbono, la serie 2XX es para piezas impresas en 3D y la serie 3XX es para piezas que se compran ya fabricadas. Por último, el 01 es para indicar que el fichero es un "PART" y corresponde a una pieza, si fuera un conjunto en fichero "PRODUCT" este último número sería 00.

Ejemplo 2: El conjunto DRONEY6.05.002.00 es un motor con su adaptador para hélice, el 002 es el número de conjunto, y, se ha reservado la serie 0XX para los conjuntos. El 00 final, como se explicó en el ejemplo 1 explica que este fichero es un "PRODUCT", y por tanto corresponde a un conjunto.

Ejemplo 3: El conjunto DRONEY6.05.000.00 corresponde al modelo completo, abriendo este fichero tenemos acceso al "PRODUCT" en el que están todos los subconjuntos y todas las piezas del modelo completo.

4.3-Estructura principal.

La estructura principal esta configurada como un product, podemos ver su aspecto en la figura 4.3.1.

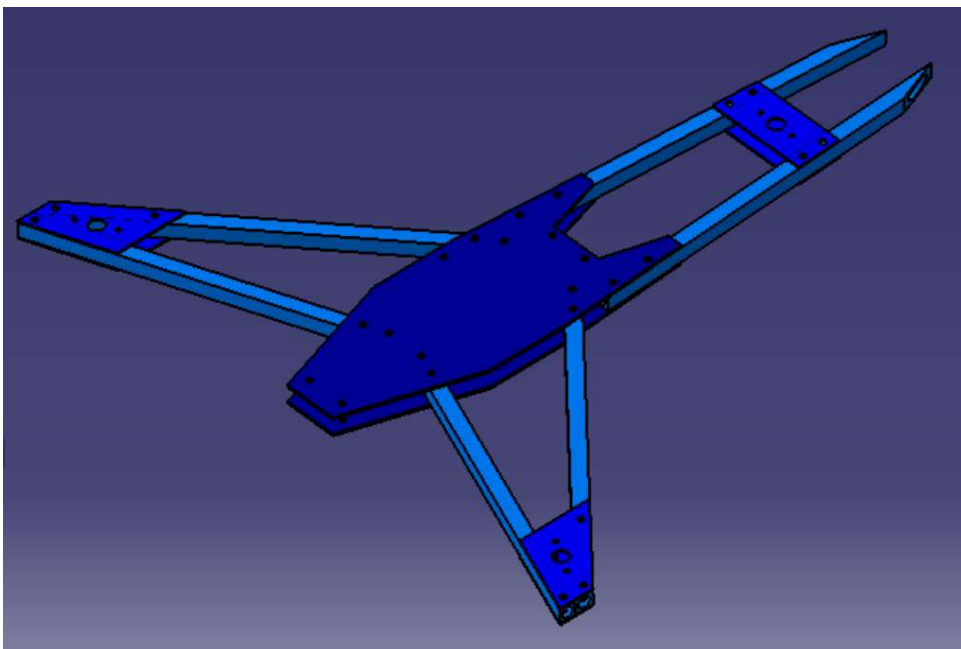


Figura 4.3.1: Modelo en Catia V5 del chasis.

Por comodidad durante el modelado, se han elegido diferentes colores para diferentes grupos de piezas, en este caso, para las piezas de fibra de carbono se ha elegido el color azul.

Podemos ver el árbol principal de este product en la figura 4.3.2:

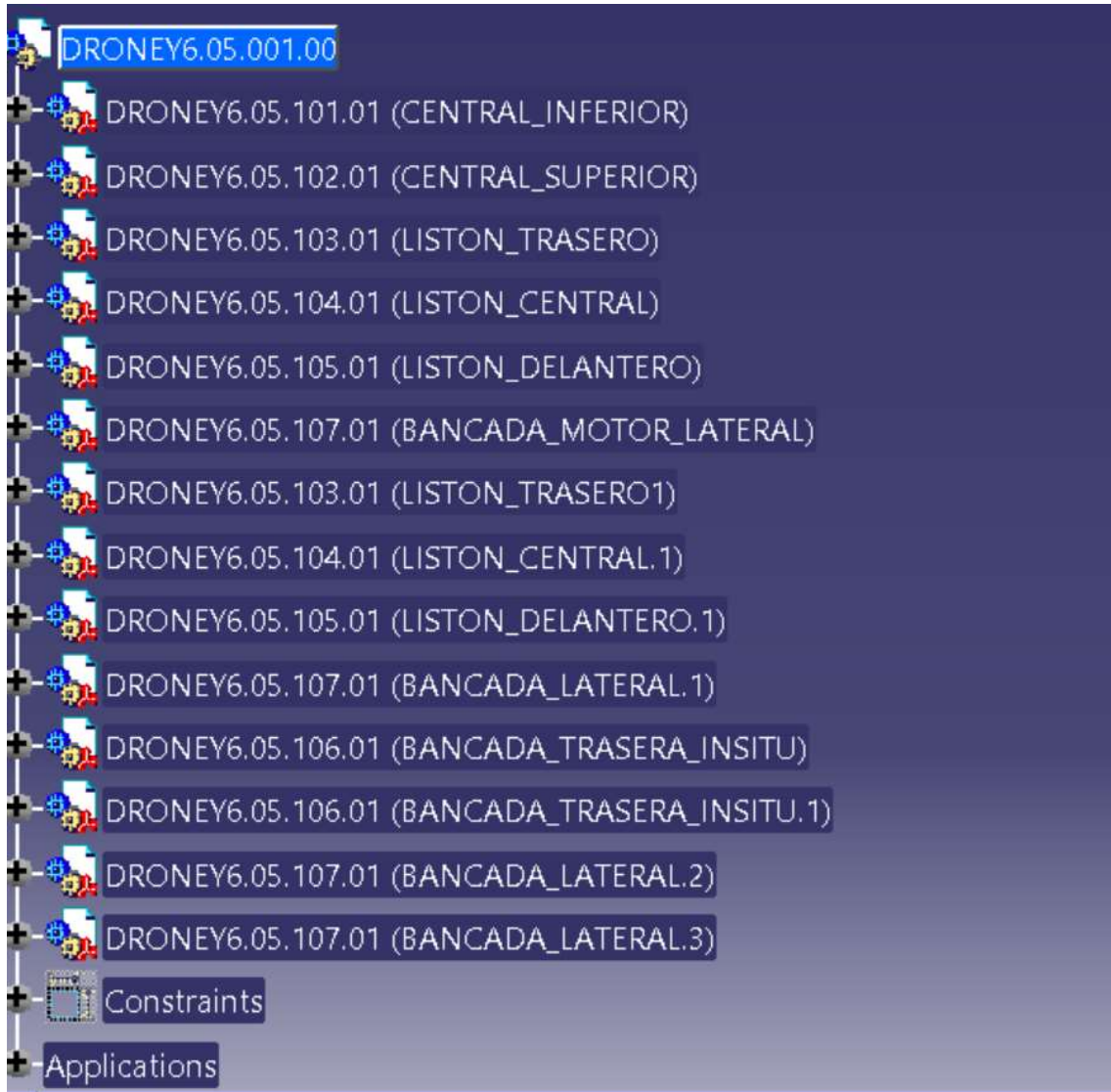


Figura 4.3.2: Árbol para el product correspondiente al chasis.

Como podemos observar, el árbol es claro y ordenado, además, para simplificar su uso, se han añadido descripciones entre paréntesis que ayudan a localizar los part que queramos tocar. Igualmente, dentro de cada part, se intenta trabajar de la manera más ordenada posible, como podemos ver en la figura 4.3.3, en la cual, tenemos un sub-árbol correspondiente a una de las piezas del chasis. Nótese la sencillez del árbol, y lo sencillo que resultará en operaciones futuras trabajar modificaciones en estos árboles.

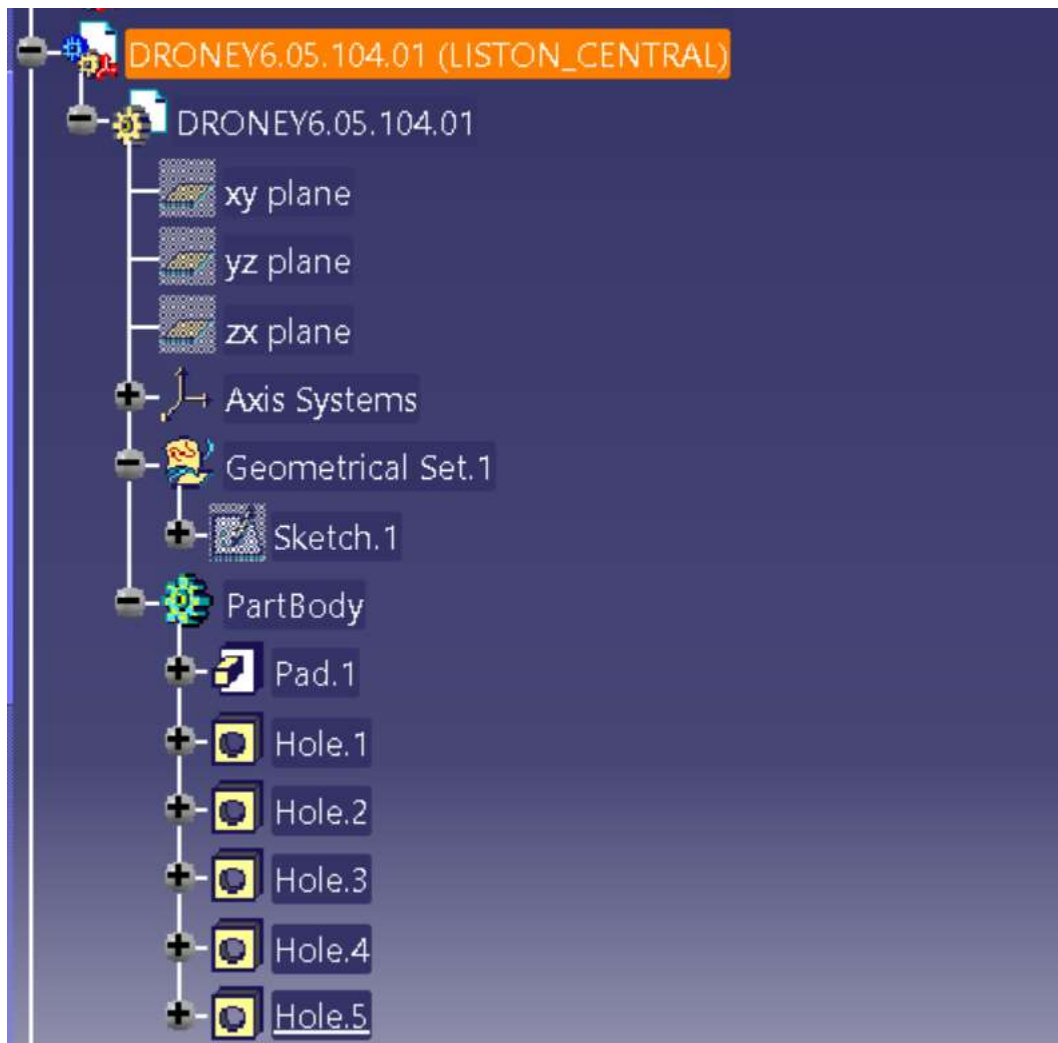


Figura 4.3.3: Sub-árbol correspondiente a un listón central del chasis.

Por último, haremos un estudio de contactos y colisiones en este product, en el cual, no pueden aparecer colisiones, solo contactos, ya que no tenemos ningún elemento roscado. Podemos ver el resultado de este análisis en la figura 4.3.4, en la cual podemos comprobar que, efectivamente, no hay sorpresas en cuanto a las relaciones de contacto.

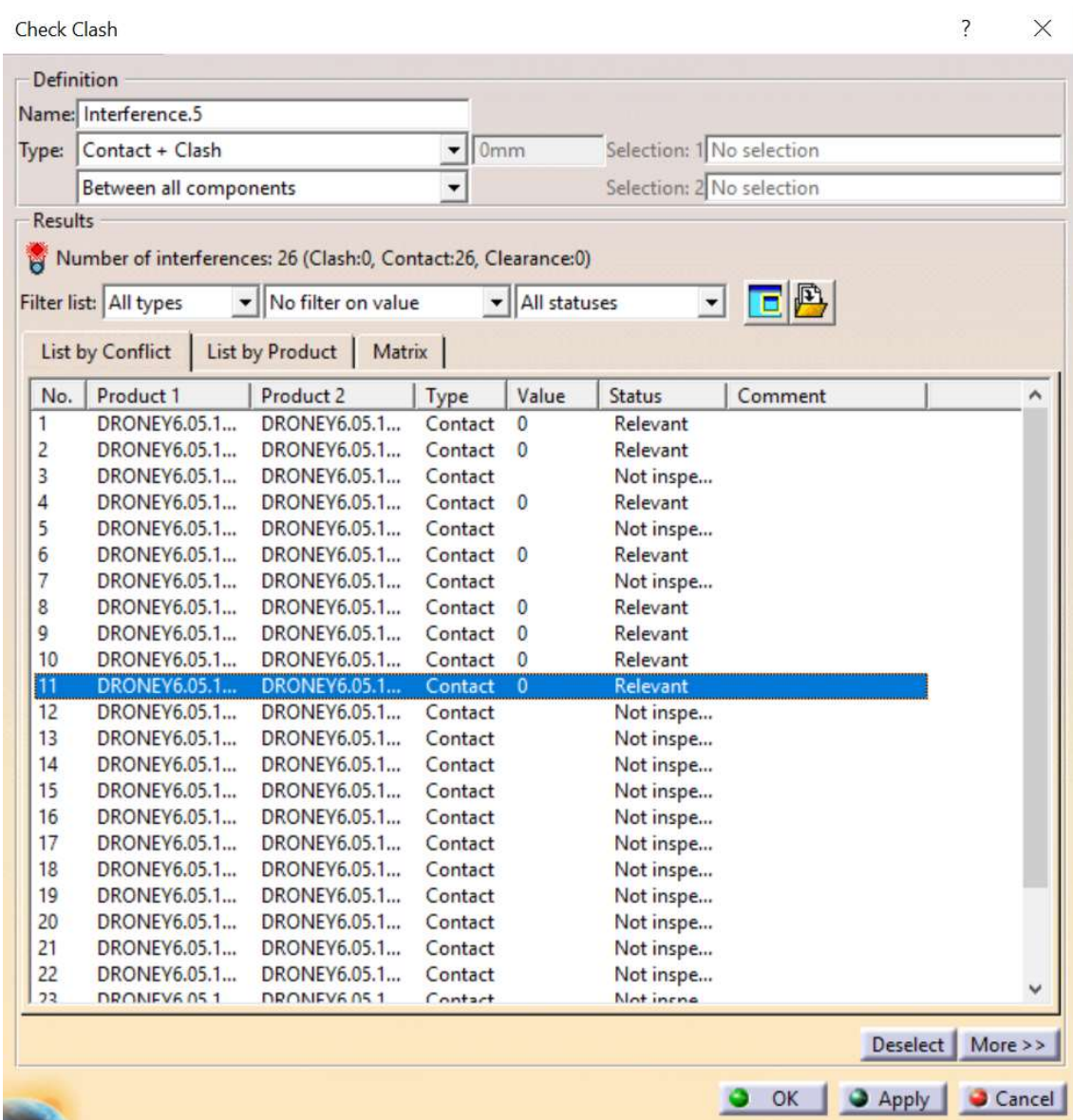


Figura 3.4.4: Análisis de contactos y colisiones para el chasis.

No se ha incluido la tornillería de nylon en el modelo, la explicación es que estas piezas son triviales y no aportan utilidad al modelo, de hecho, para el uso real del modelo, estas piezas resultan un impedimento para trabajar con fluidez, ya que, por ejemplo, si estamos diseñando una pieza para imprimir en 3D y queremos que tenga taladros coincidentes con los del chasis, es muy rápido hacerlo usando el hueco, pero no es tan cómodo de hacer si está el tornillo ahí.

4.4-Conjuntos de motorización.

Los motores son conjuntos muy sencillos y además son exactamente iguales, por tanto, se hace un solo conjunto y se copia hasta llegar a los 6 conjuntos de motorización. No se han incluido las hélices en estos conjuntos ya que se ha preferido tratarlas aparte, no solo porque hay dos tipos de hélice (las levógiras y las dextrógiras) sino también porque son los únicos sólidos creados por superficies en este proyecto. Así pues, podemos ver el aspecto del conjunto motor, formado por motor y portahélices con cono roscado en la figura 4.4.1. Al igual que el color azul, se ha usado para las piezas de fibra de carbono, para las piezas relacionadas con el sistema de potencia, se ha elegido el verde, esto incluye a los motores y la batería.

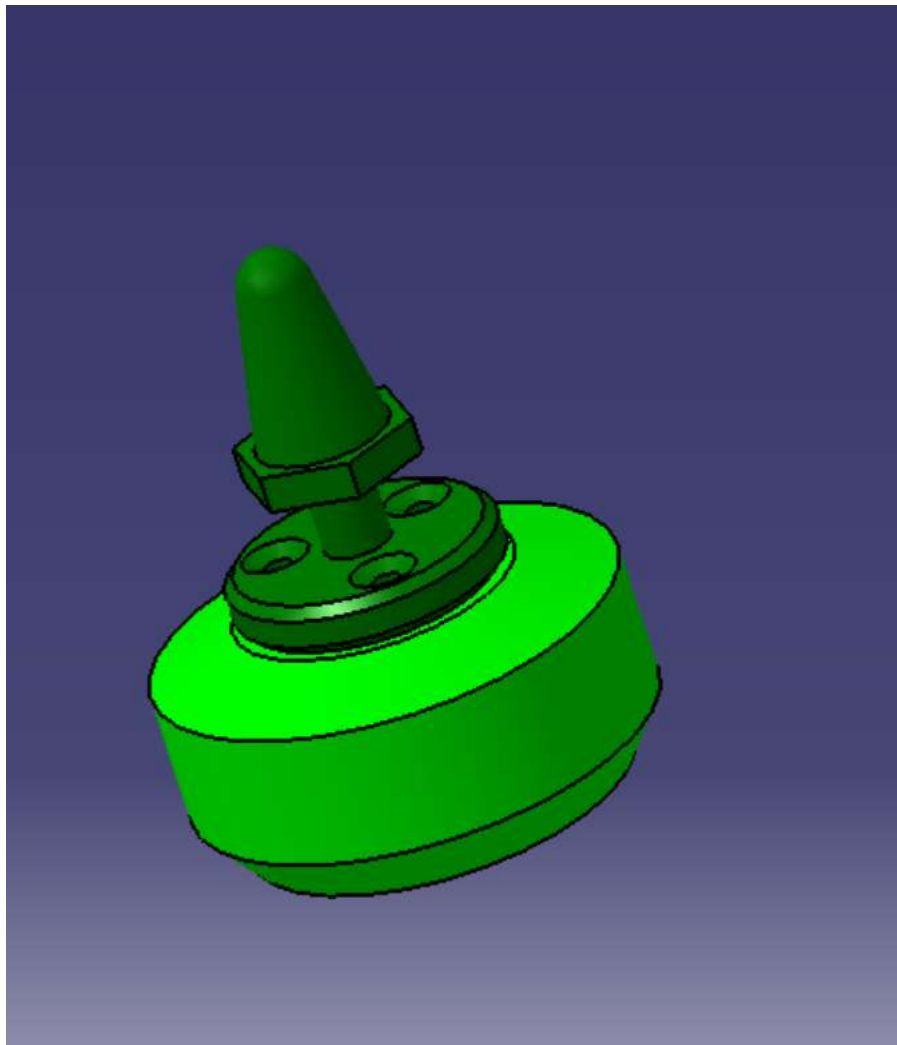


Figura 4.4.1: Conjunto motor.

Podemos apreciar en la figura 4.4.1, que el modelo del motor no es una reproducción exacta de este, pues no podemos ver las aperturas de la ventilación, ni tenemos acceso a componentes internos como son los rodamientos. Esto es algo que se hará así con todos los componentes de compra, se trabaja con su envolvente por simplicidad de modelado, y se recogen con exactitud únicamente las dimensiones críticas para la integración de estas piezas en el resto del modelo. Por ejemplo, las dimensiones del eje,

su posición, su rosca, y los taladros para tornillería si están recogidos con total exactitud. Podemos ver también en la figura 4.4.2, el mismo modelo pero por la parte inferior, y se aprecian todos los taladros roscados para la bancada, incluidos los que no usamos, por si en modificaciones futuras cambiamos de tipo de bancada. También vemos como sobresale un poco del eje por abajo, esto es una reproducción exacta también, para dimensionar correctamente el hueco necesario en la bancada.

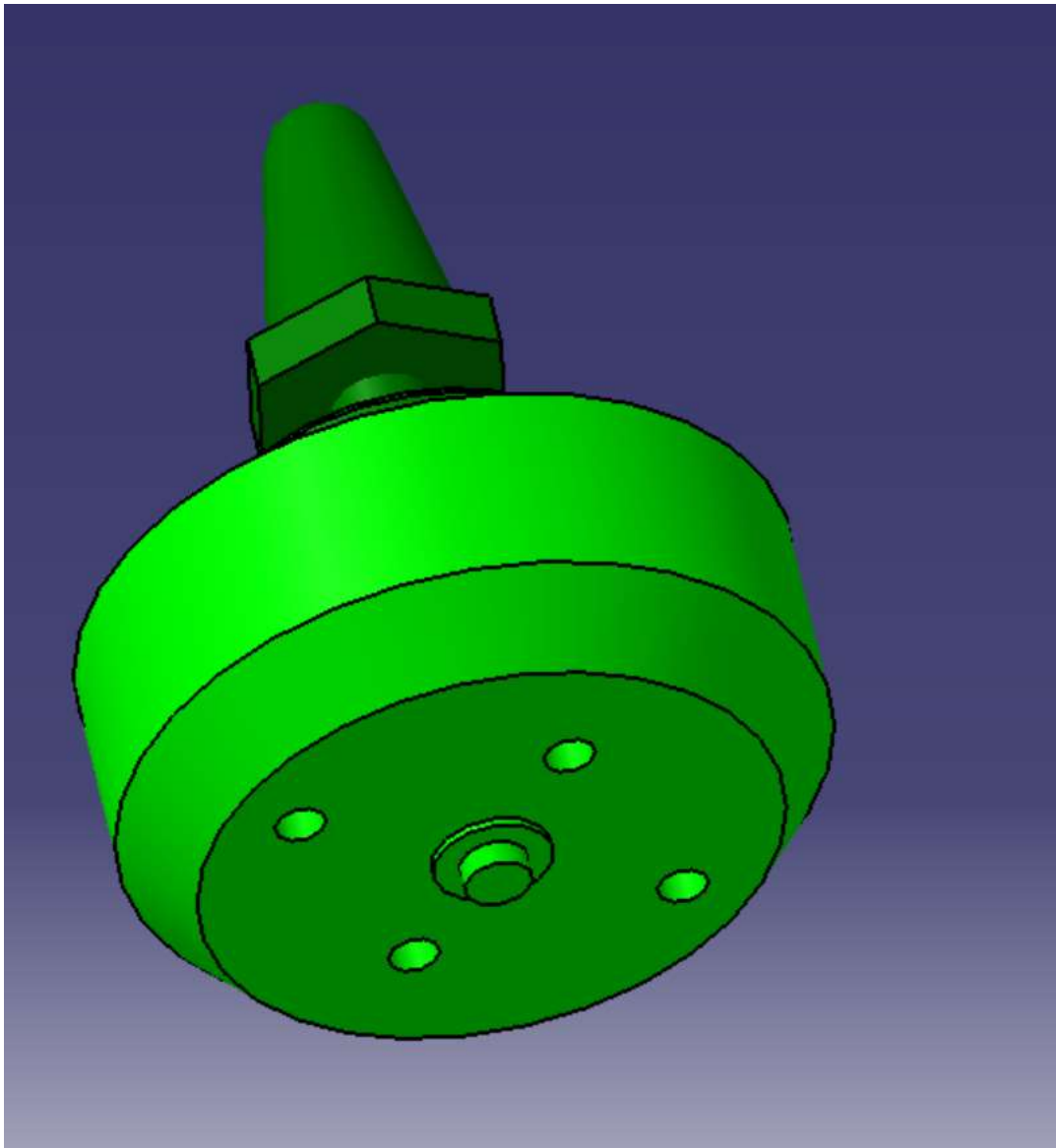


Figura 4.4.2: Vista inferior del modelo del motor.

Igualmente que con el chasis, cuidamos el orden en el árbol de este conjunto, podemos verlo en la figura 4.4.3 donde vemos el árbol completo, ya con un sub-árbol abierto.

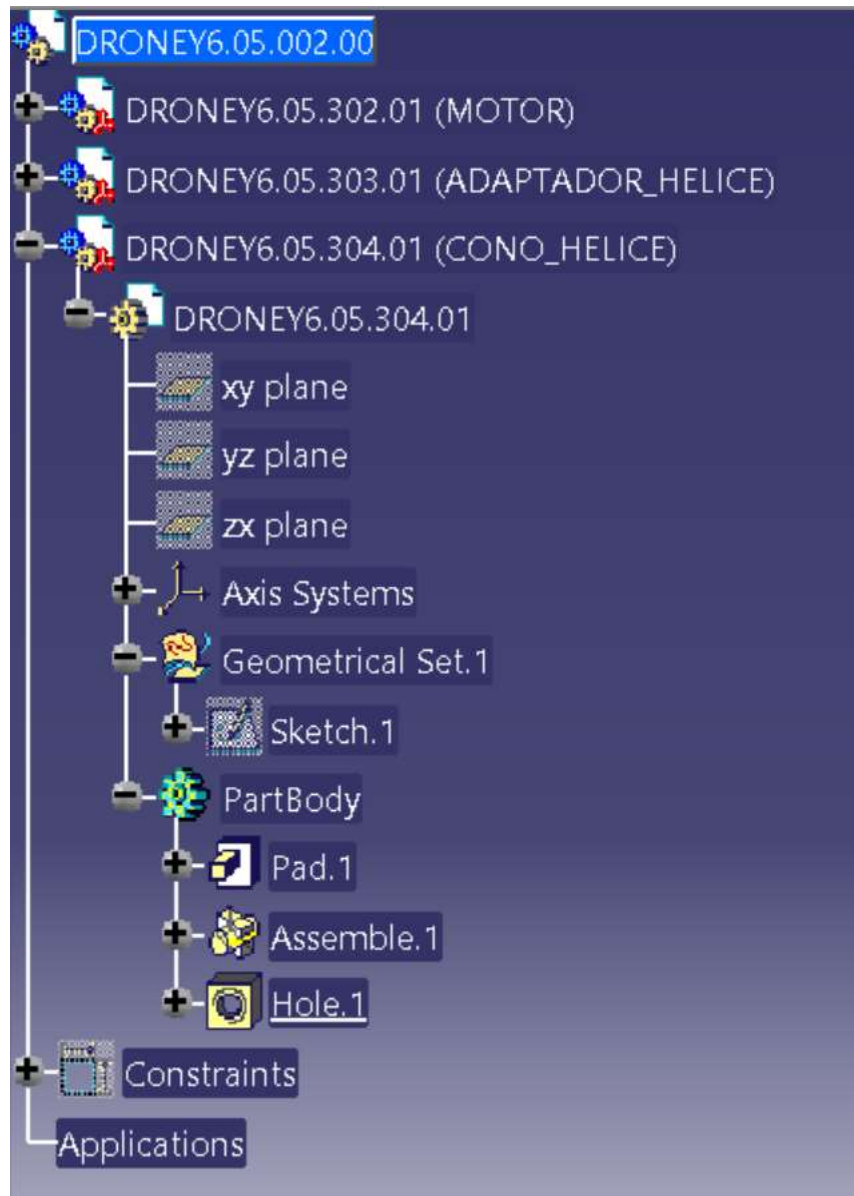


Figura 4.4.3: Árbol del conjunto motor con sub-árbol abierto.

Hacemos aquí también el análisis de colisiones y contactos, pero con la diferencia de que esta vez tenemos una unión roscada. En catia, las uniones roscadas dan colisión, no debe alarmarnos esto, simplemente hay que repasar cuidadosamente las uniones roscadas, para ver que la colisión no acarrea fallos, y comprobar que no hay otras colisiones que no sean las de las uniones roscadas. Como podemos ver en la figura 4.4.4, efectivamente, tenemos una colisión en la unión roscada, pero todo lo demás está en orden, por tanto, no hay de que preocuparse. En la figura 4.4.5 podemos ver además la representación en el modelo de dicha colisión.

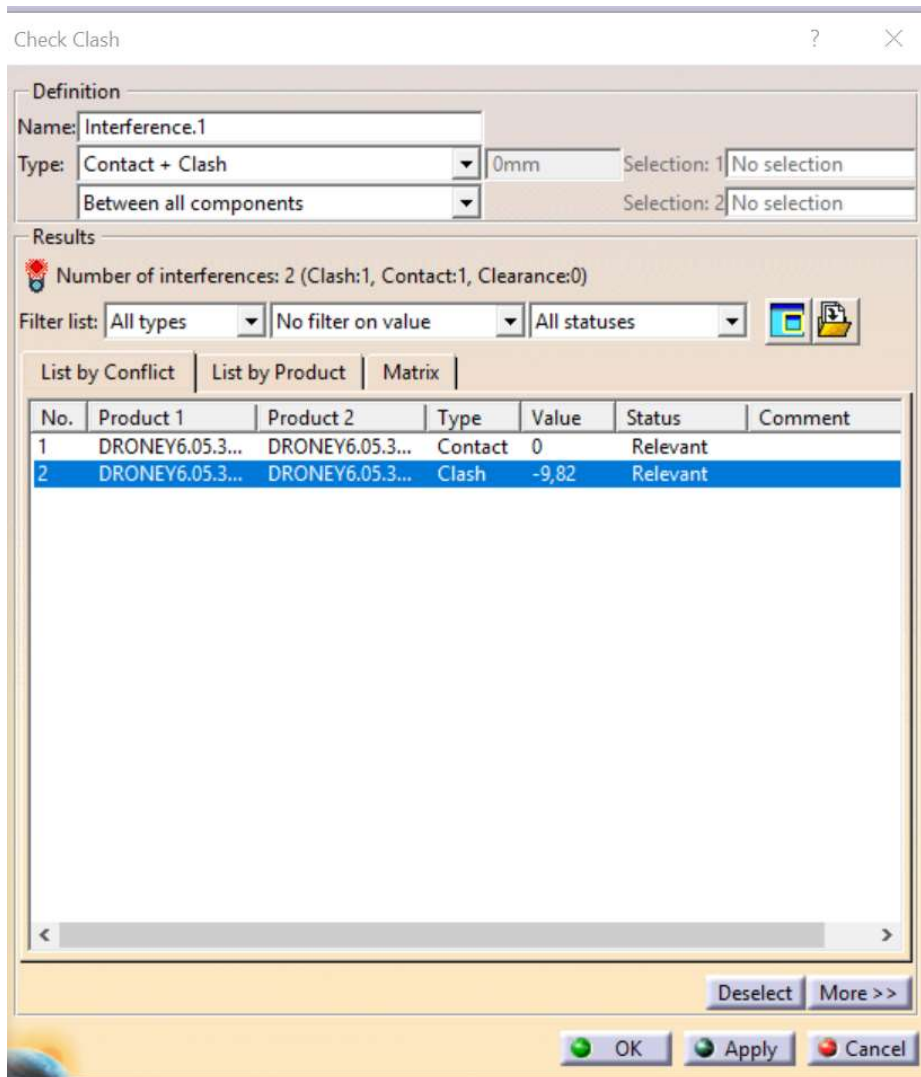


Figura 4.4.4: Análisis de colisiones en conjunto motor.

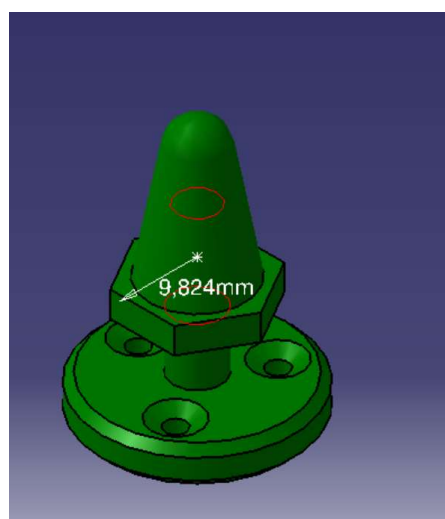


Figura 4.4.5: visión en modelo de la colisión.

4.5-Hélices.

Las hélices son las únicas piezas que requieren del modulo de Catia “generative shape design”, que es con el que elaboramos superficies complejas, las dimensiones de este modelo son aproximadas con muy baja precisión, ya que este modelo aporta muy poco al proyecto, pero si se ha tenido en cuenta el sentido de giro, de forma que hay dos part diferentes, uno para las hélices levógiras y otro para las dextrógiras. Podemos ver el aspecto del modelo en la figura 4.5.1.

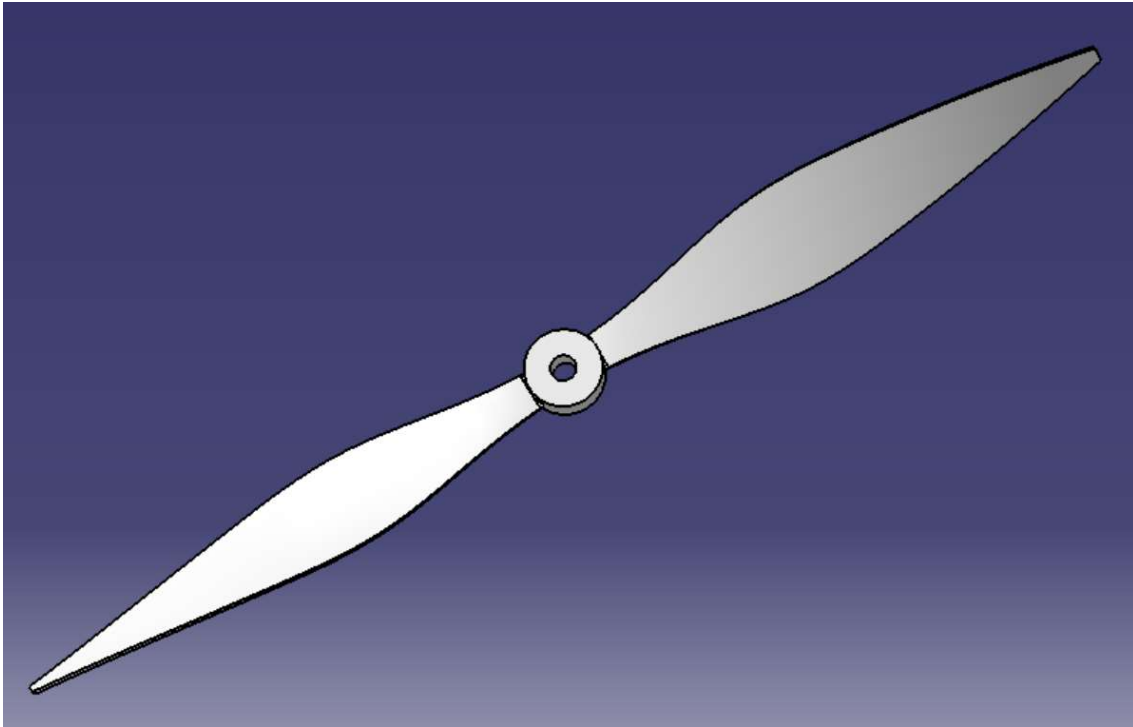


Figura 4.5.1: Modelo de hélice.

Vamos a ver ahora, en la figura 4.5.2, una imagen del árbol correspondiente a este modelo, en el, podemos ver operaciones muy diferentes a las utilizadas para el resto de piezas. Resulta curioso, que siento una pieza de apariencia simple, y, que no guarda especial precisión con su pieza real, ha sido la pieza más difícil y trabajosa de modelar. No debemos olvidar también, que el módulo correspondiente a superficies es uno de los más completos y complejos de Catia.

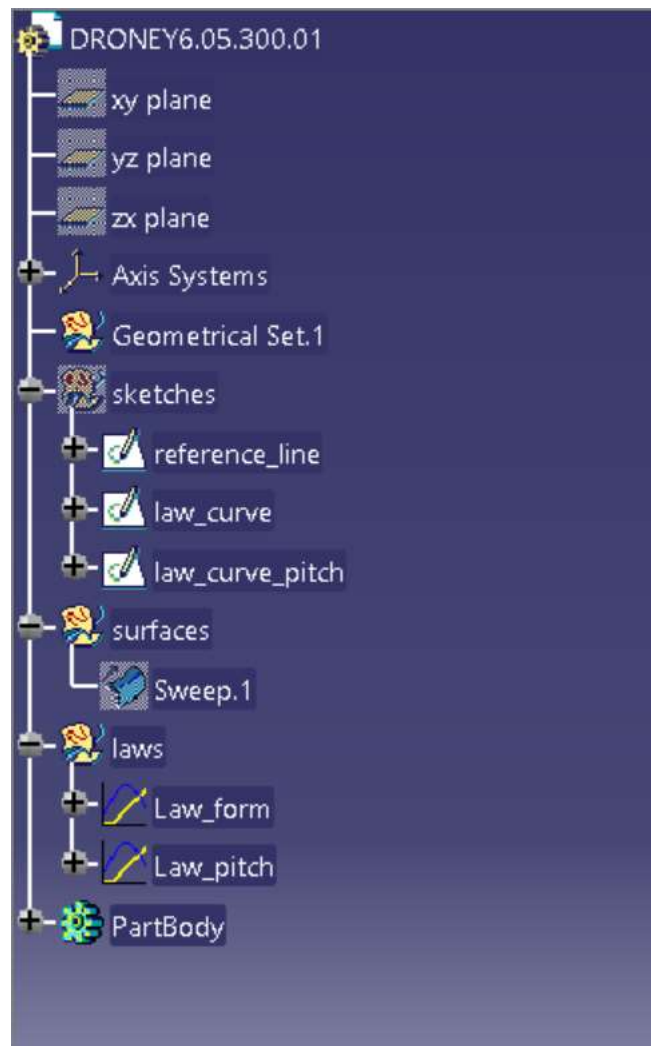


Figura 4.5.2: Árbol del modelo de la hélice.

El único uso útil que se le ha dado a este modelo es el de probar como podemos colocar las hélices con el fin de meter el dron en alguna maleta o caja para su transporte, comparar el tamaño con y sin hélices y poco más. Ya que, para saber dónde pueden colisionar las hélices en movimiento, y así colocar correctamente los componentes, este modelo no es útil, primero porque habría que estar manipulándolo continuamente para colocar la hélice en la posición que queremos comprobar, y después, porque este modelo no contempla la deformación que sufre la hélice por la presión del aire en la zona inferior, que tiende a elevar las puntas hacia arriba. Así que, para ayudarnos a comprobar correctamente las posibles colisiones con las hélices en movimiento, creamos un part tan simple como un disco, en el que incluimos ya las dimensiones a las que puede dar lugar la hélice deformada, exagerado un poco por seguridad, para dar cierto margen de error. Este part se va ocultando y mostrando según se necesite, y su aspecto podemos verlo en la figura 4.5.3.

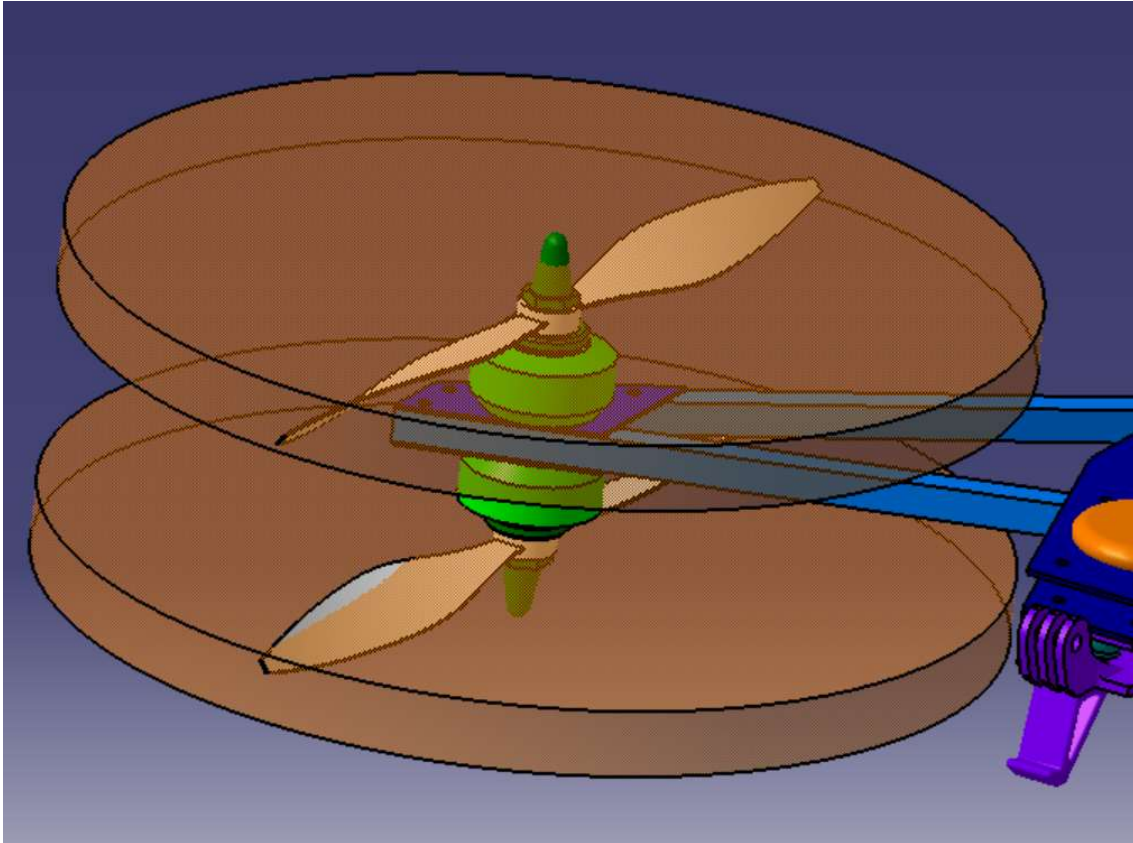


Figura 4.5.3: Modelo del movimiento de las hélices.

Como podemos observar, este modelo cuenta con las propiedades contrarias al de la propia hélice, pues es realmente simple, y sin embargo ofrece una gran ayuda y una clara visión de donde pueden colisionar las hélices, y con esto probaremos donde podemos colocar componentes y donde no, o como dimensionar accesorios que puedan entrar en conflicto fácilmente con las hélices.

4.6-Componentes electrónicos y auxiliares.

Todo en trabajo anterior en lo referente al modelado, se hizo precisamente para poder trabajar cómodamente en el diseño de los componentes auxiliares. Esto es así porque ahora que tenemos un modelo completo de las piezas que podemos considerar fijas, podemos probar diferentes configuraciones para componentes electrónicos, o piezas que pueden imprimirse en 3D diseñadas directamente sobre el modelo. Por tanto, a partir de aquí es donde de verdad se le saca utilidad al modelo. Vamos a ver algunos ejemplos de esto. Siguiendo con el método de asignar colores a diferentes grupos de piezas, se ha asignado el naranja para piezas relacionadas con el sistema de navegación. Y, el morado para piezas diseñadas para imprimir en 3D.

Veamos el modelo completo, desde diferentes puntos de vista. En la figura 4.6.1. podemos ver el modelo completo en una vista isométrica en la que vemos la parte superior del aparato.

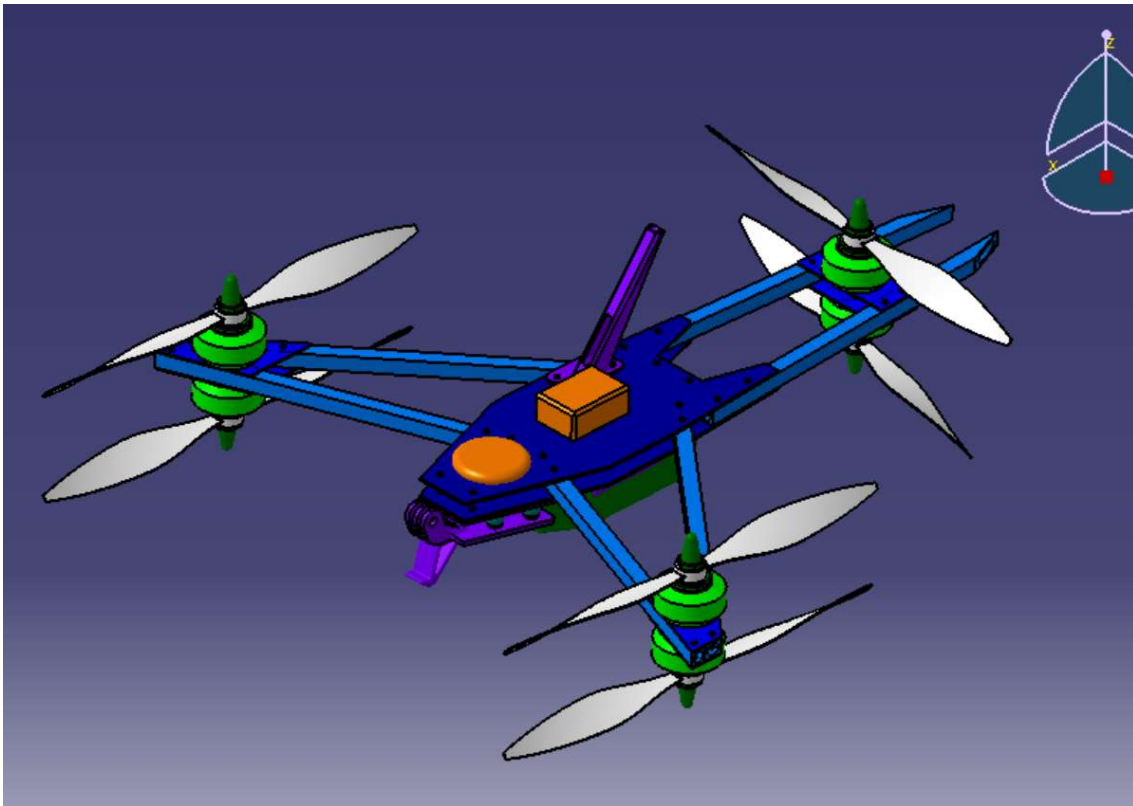


Figura 4.6.1: Vista isométrica del modelo completo.

En esta vista, podemos ver en color naranja y con forma redonda, el dispositivo que incluye sensor GPS y brújula, y con forma rectangular, la controladora principal. Estos, al igual que se hizo con los motores, son simples envolventes con las dimensiones necesarias para moverlos por el modelo completo analizando posibles localizaciones y colisiones.

También podemos ver algunas piezas impresas en 3D, el soporte para la antena, por ejemplo, el cual habría sido difícil de diseñar sin el modelo completo del dron, y, sin embargo, contando con este modelo, ha sido sencillo y se ha podido estudiar fácilmente la inclinación para que no colisione con las hélices traseras.

En esta misma figura (4.6.1), podemos ver en la parte delantera un soporte amortiguado diseñado para portar una cámara de tipo GoPro junto con la cámara de tipo FPV. Para este cometido hay dos diseños diferentes, uno situado en la zona inferior, y otro diseñado para colocar en la zona superior, este ultimo requiere lógicamente recolocar el sensor GPS. Podemos ver una imagen del conjunto del soporte inferior en la figura 4.6.2, y una del soporte superior en la figura 4.6.3.

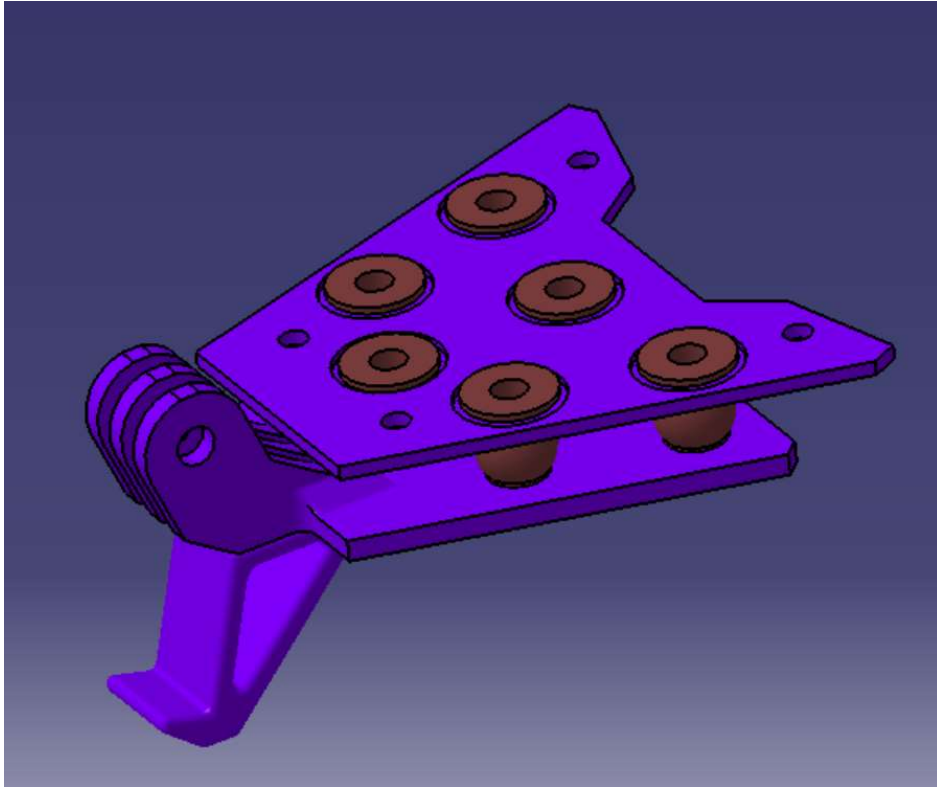


Figura 4.6.2: Soporte inferior para cámara GoPro y cámara FPV.

En estas figuras (4.6.2 y 4.6.3), podemos ver en color morado las piezas que se imprimirán en 3D, y en color marrón los silenblocks de goma que ayudan a amortiguar las vibraciones para conseguir una imagen de mayor calidad.

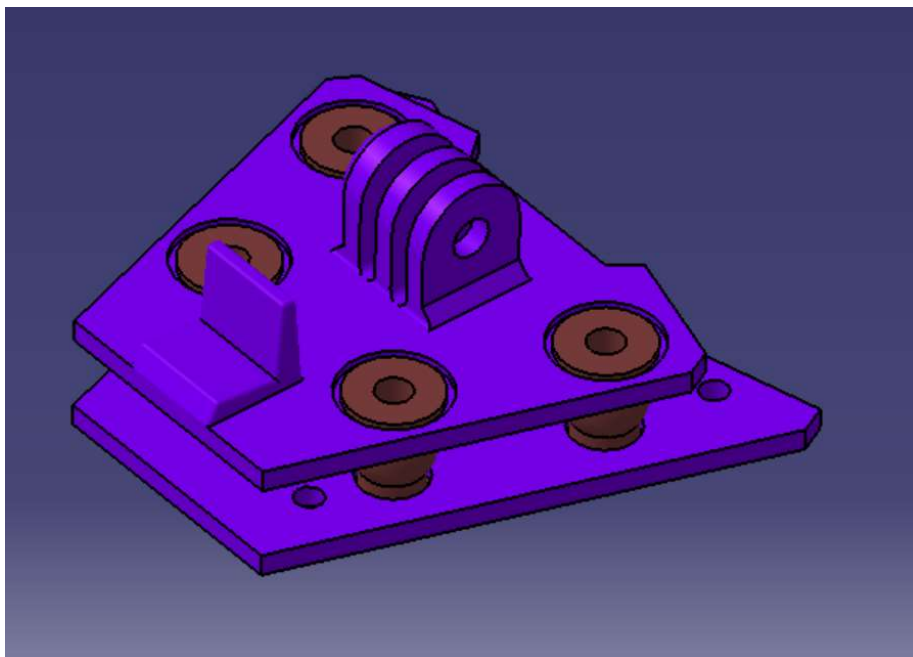


Figura 4.6.3: Soporte superior para cámara GoPro y cámara FPV.

Veamos ahora una vista inferior del aparato en la figura 4.6.4.

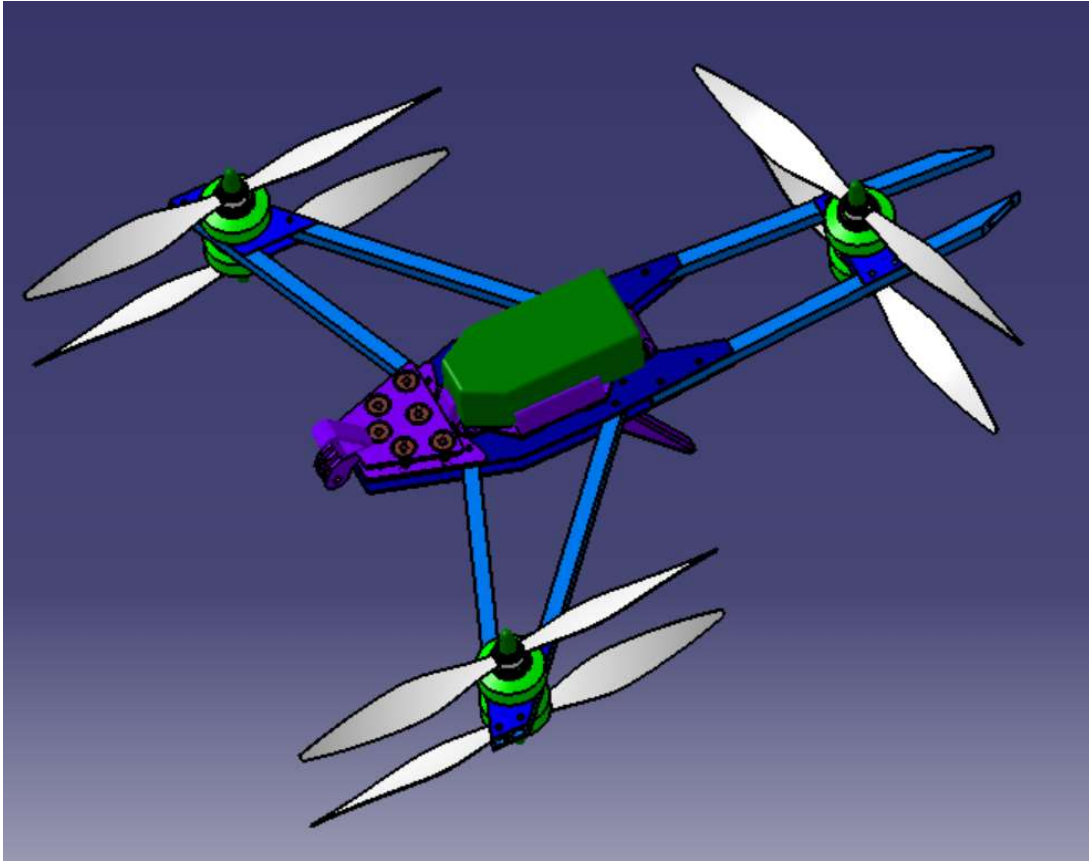


Figura 4.6.4: Vista inferior del modelo completo.

Aquí podemos ver la pieza con la cual más se ha aprovechado el modelo completo, el porta baterías, en verde oscuro justo en el centro vemos la batería, y vemos también una pieza morada diseñada para sujetar la batería. Veamos esta pieza aislada del resto en la figura 4.6.5.

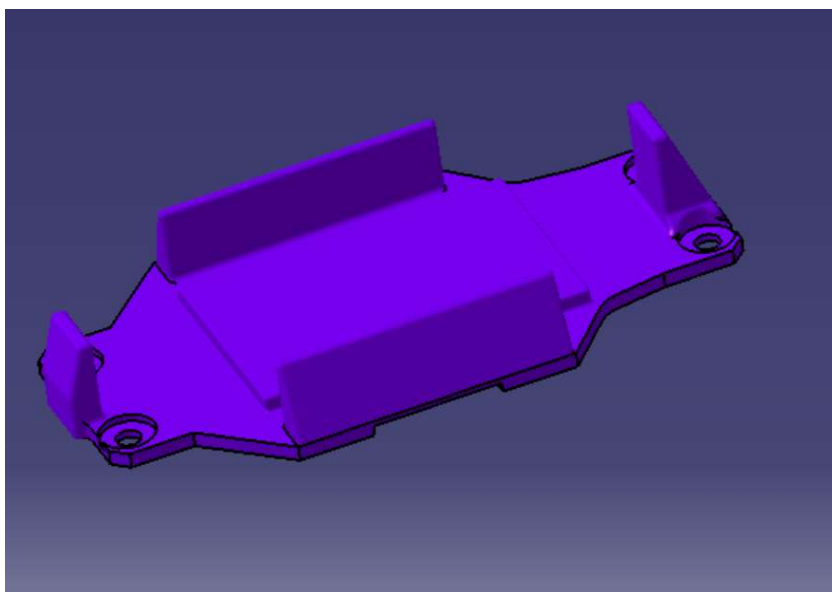


Figura 4.6.5: Modelo del porta baterías.

Esta pieza, con una geometría ciertamente compleja, va atornillada al chasis, y debe sujetar la batería con la menor holgura posible, además, tiene un hueco justo donde hace contacto con el chasis, para que por el pase una cinta de velcro que completara la sujeción de la batería. Contando con el modelo tanto del dron como de la batería, como vimos en la figura 4.6.4, vemos que el diseño dentro del modelo global se simplifica considerablemente.

5-Simulaciones y características esperadas.

Vamos a introducir todos los datos que tenemos sobre el dron, antes de volarlo, para estimar, con ayuda de una simulación, cuales serán las propiedades reales que podemos esperar de este aparato. Para ello, usaremos el simulador eCalc, en el cual podemos meter nuestro modelo exacto de motores, batería, variadores y peso total, para que este nos de resultados acerca de la relación potencia/peso, la autonomía, calentamiento de componentes y posibles fallos, entre otros, que podríamos esperar. Para esto, repetiremos la simulación con dos pesos diferentes, ya que el aparato en configuración básica pesa solo 1´4kg, pero al cargarlo podemos llegar a los 1´9kg fácilmente, ambos pesos incluyen la batería, son pesos completos en vuelo.

-Simulación para 1,4kg de peso.

El panel de entrada de datos, ya relleno para 1,4kg de peso total, tiene el aspecto de la figura 5.1.

Version completa para socios
DRONEY6.05

datos sin garantía de precisión: +/-15%

xcopterCalc - Calculador de Multicópteros

News | Toolbox | Easy View | Help | Tutorial | Submit Specs | Language:

General	Refrigeración del Motor: buena	Nº de rotores: 6 coaxial	Peso del modelo: 1400 g 49.4 oz	con Motorización	Tamaño del armazon: 380 mm 14.96 inch	Límited de inclinación de la FCU: 35°	Altura del campo de la FCU: 100 m ASL 328 ft ASL	Temp. aire: 25 °C 77 °F
Celdas batería	Tipo (Cont. / max. C) - nivel de carga: LiPo 4000mAh - 65/100C - llena		Configuración: 4 S 1 P	Capacidad por celda: 4000 mAh 4000 mAh total	descarga max. 85%	Resistencia: 0.0028 Ohm	Voltaje: 3.7 V	capacidad C de descarga: 65 C continua 100 C de pico
Variador	Tipo: max 20A	Corriente: 20 A cont. 20 A max.	Resistencia: 0.01 Ohm	Peso: 25 g 0.9 oz	Accesorios		Consumo de corriente: 1.5 A	
Motor	Fabricante - Tipo (Kv): EMAX buscando... Asistente KV hélice	KV (w/o torque): 650 rpm/V	Corriente sin hélice: 0.4 A @ 10 V	Límite (hasta 15s): 250 W	Resistencia: 0.197 Ohm	Longitud caja: 21 mm 0.83 inch	nº Polos mag.: 14	
Hélice	Tipo de hélice: Graupner E Prop	- 0°	Diámetro: 11 inch 279.4 mm	Paso: 5 inch 127 mm	número de palas: 2	Const.de Potencia/Empuje: 1.10 / 1.0	Gear Ratio: 1 : 1	

Figura 5.1: Panel de entrada de datos para ecalc.

Veamos ahora los resultados que arroja este software para nuestra configuración. Empecemos con los indicadores gráficos, ya que estos son muy intuitivos y amables de interpretar. Los tenemos en la figura 5.2.

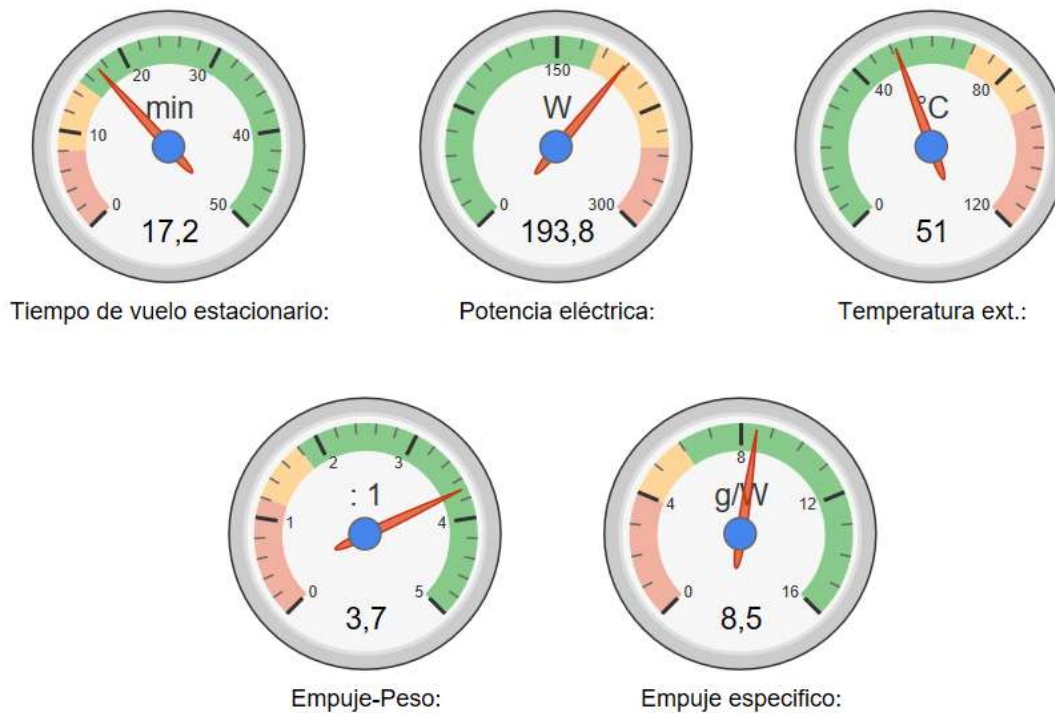


Figura 5.2: Indicadores gráficos de propiedades esperadas.

De momento, son todo buenas noticias, el tiempo de vuelo de más de 17 minutos es muy bueno, teniendo en cuenta la configuración coaxial. La temperatura del motor es muy baja, por lo que no habrá problemas de calentamiento ni pérdida de eficiencia notable por efecto del calor. La relación empuje-peso es sobresaliente, con una relación de 3,7 aseguramos una gran capacidad de carga y una resistencia a perturbaciones, como el viento, realmente alta. Y, por último, el empuje específico, lo que anteriormente hemos llamado eficiencia, es de 8´5, lo cual sitúa nuestro aparato a la altura de los mejores drones del mercado actualmente en cuanto a rendimiento. Profundizando mas en la información obtenida por este software, vemos en la figura 5.3 los datos obtenidos para la motorización.

Motor a eficiencia óptima		Motor al Máximo		Motor @ Hover		Motorización Total	
Corriente:	6.09 A	Corriente:	13.01 A	Corriente:	1.72 A	Peso de la Motorización:	1122 g
Voltaje:	15.55 V	Voltaje:	14.90 V	Voltaje:	15.93 V		39.6 oz
Revoluciones*:	9264 rpm	Revoluciones*:	7877 rpm	Revoluciones*:	3679 rpm	Empuje-Peso:	3.7 : 1
Potencia eléctrica:	94.7 W	Potencia eléctrica:	193.8 W	Acelerador (log):	25 %	Corriente en estacionario:	10.34 A
Potencia mecánica:	79.6 W	Potencia mecánica:	152.2 W	Acelerador (lineal):	41 %	Pot(entrada) en estacionario:	166.6 W
Eficiencia:	84.1 %	Potencia-Peso:	830.5 W/kg	Potencia eléctrica:	27.5 W	Pot(salida) en estacionario:	130.6 W
			376.7 W/lb	Potencia mecánica:	21.8 W	Eficiencia en estacionario:	78.4 %
		Eficiencia:	78.5 %	Potencia-Peso:	119.0 W/kg	Corriente al máximo:	78.03 A
		Temperatura ext.:	51 °C		54 W/lb	Potencia(entrada) al máximo:	1257.2 W
			124 °F	Eficiencia:	79.3 %	Potencia(salida) al máximo:	913.1 W
				est. Temperatura:	29 °C	Eficiencia al máximo:	72.6 %
					84 °F		
		Medidas de potencia		Empuje específico:	8.50 g/W		
		Intensidad:	78.06 A		0.3 oz/W		
		Voltage:	15.03 V				
		Potencia:	1173.2 W				

Figura 5.3: Datos estimados para la motorización.

De estos datos, destacamos lo siguiente, en hover tenemos los datos mas parecidos a lo que seria el régimen permanente del uso del motor, y de aquí, sacamos que los consumos son mas bajos aun de lo que esperábamos según las tablas de fabricante, además, vemos que la eficiencia es superior al 79%, cifra muy buena. También, en temperatura de motor, vemos que solo llegamos a 29 grados centígrados, esto es completamente despreciable, por lo que podemos asegurar que, según estos datos, los motores trabajaran a baja carga, tal como se intentó en el diseño. Tenemos también una representación grafica del comportamiento del motor, muy interesante para estudiar de forma rápida y visual el comportamiento de los motores en esta configuración. La gráfica la tenemos en la figura 5.4.

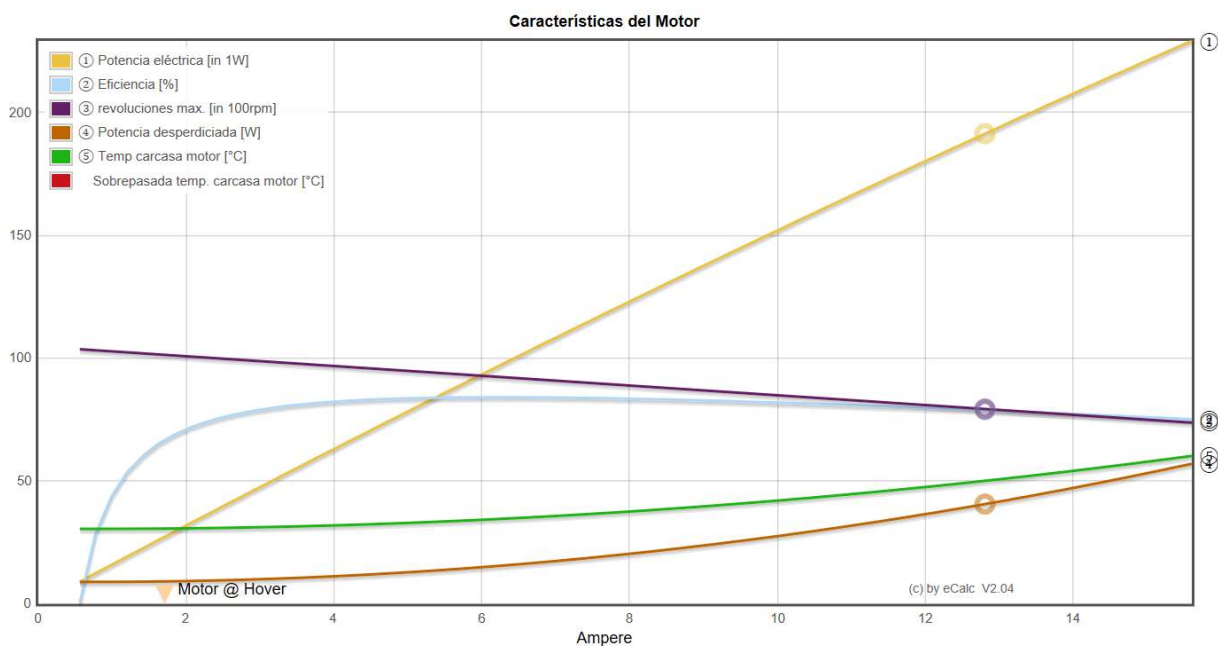


Figura 5.4: Gráfica de comportamiento del motor.

De la gráfica, podemos extraer que los datos son, en general muy estables en un amplio rango de carga, esto es bueno, ya que no esperamos sorpresas según el nivel de carga al que sometamos el motor, por ejemplo, la eficiencia desde los 2A hasta los 15A es casi horizontal. Y la temperatura nunca supera ningún valor preocupante. Tenemos también un apartado velocidades esperadas en la figura 5.5.

inclinación máxima:	35 °
velocidad máxima:	28 km/h
	17.4 mph
Trepada estimada :	9.9 m/s
	1949 ft/min
Area total del disco:	18.39 dm ²
	285.05 in ²
Fallo del motor:	

Figura 5.5: Velocidades esperadas.

De aquí podemos extraer que, aunque la relación potencia-peso sea muy alta, la velocidad máxima es realmente baja, de menos de 30km/h, esto es debido a que la placa principal, por seguridad, limita el ángulo máximo de la aeronave a 35 grados. En principio no es problema, ya que esta aeronave no requiere de altas velocidades, no obstante, si fuera necesario, bastaría con cambiar de placa a una que no tenga esta limitación, de esta manera, se aumentaría drásticamente el comportamiento del aparato, y entre otras cosas, la velocidad máxima aumentaría. Podemos estimar cuanto aumentaría con solo repetir la simulación con un ángulo mas agresivo. Veamos que pasa en la simulación si eliminamos la limitación de ángulo de inclinación en la figura 5.6.


inclinación máxima:	71 °
velocidad máxima:	46 km/h
	28.6 mph
Trepada estimada :	9.9 m/s
	1949 ft/min
Area total del disco:	18.39 dm ²
	285.05 in ²
Fallo del motor:	

Figura 5.6: Velocidades esperadas sin limitación de ángulo

De aquí extraemos que el aparato podría inclinarse hasta los 71 grados, alcanzando los 46km/h, que tampoco es una velocidad muy alta, tengamos en cuenta que los drones de carreras superan con facilidad los 100km/h. De todas formas, eligiendo una motorización de máximo rendimiento es lógico que no obtengamos unas velocidades muy altas, ya que los motores que se usan en drones de carreras operan a unos 3gr/w de eficiencia, contra los 8'5 que obtenemos de nuestro aparato.

Otro dato que nos arroja este simulador es si el dron podría hacer vuelo ante fallo motor aprovechando la redundancia de sus motores, ya que el disponer de motorización redundante es condición necesaria pero no suficiente, y, en nuestro caso, tenemos capacidad de vuelo ante fallo de motor.

Por último, el programa ofrece una gráfica en la que podemos ver rango de acción del aparato en función de la velocidad a la que lo movamos, es decir, la relación entre la velocidad y el rendimiento del aparato, resulta interesante estudiarla si se va a destinar el aparato a recorrer largas distancias, suponiendo claro está, que se han instalado los componentes adecuados para largo alcance. Veamos esta grafica en la figura 5.7.

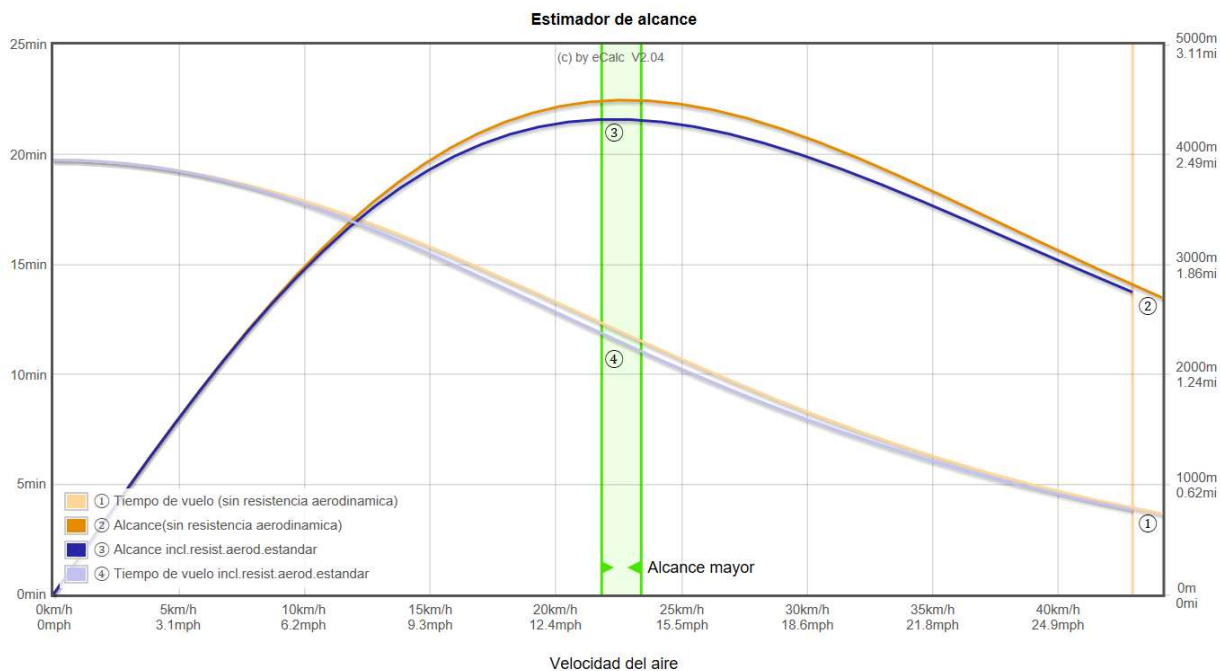


Figura 5.7: Gráfica de velocidades y alcance máximo del multicoptero.

De esta gráfica, podemos concluir que lo mejor es volar a una velocidad de crucero intermedia, pues tanto a velocidades bajas, como muy altas, el alcance se ve reducido. En este sentido, podemos decir que es un comportamiento bastante habitual en cualquier vehículo autopulsado.

-Simulación para 1,9kg.

Puesto que la información se presenta exactamente igual, pero con valores diferentes, no hay necesidad de incluir las mismas figuras repetidas para la nueva configuración. En vez de eso, comentaremos las diferencias más destacables.

En primer lugar, la autonomía baja hasta los 11´4 minutos, que es suficiente, aunque por poco, con lo que esperábamos al principio del diseño.

La temperatura y el rendimiento del motor no varían, pero si lo hace el empuje específico, que baja hasta los 7,3gr/W.

La relación empuje-peso, lógicamente se ve muy afectada, bajando hasta 2´7.

La velocidad máxima (sin limitación de ángulo) a penas se resiente, bajando a 44km/h.

La capacidad de vuelo ante fallo de motor se mantiene. Quizás este es el dato más importante.

6-Resultados reales.

Los resultados que podemos extraer de vuelos reales no son tantos como los que hemos visto en la simulación, pero si son los que mas nos interesan, y, comparándolos con los obtenidos por simulación, podemos al menos intuir si el resto de valores simulados son fiables.

Los parámetros que podemos medir o calcular con ayuda de vuelos reales y con nuestros equipos son:

- Autonomía, con ayuda de un cronometro
- Consumos eléctricos medios y de pico, con ayuda del OSD.
- Empuje especifico medio, calculando usando datos de la batería y consumos eléctricos.

Veamos una comparación entre datos reales y simulados para un peso total de 1´4kg en la tabla 6.1.

	1´4kg Simulacion	1´4kg Real	concordancia (%)
Autonomia (min)	17,2	17	98,8
Consumo medio (A)	10,32	11	93,8
consumo de pico (A)	78,06	44	56,4
Empuje especifico (gr/W)	8,5	8	94,1

Tabla 6.1: Comparación de datos reales contra simulados para 1´4kg.

Como podemos observar, la concordancia es altísima excepto para el consumo máximo, que en el caso real es mucho más bajo, esto se debe a que la placa controladora limita la velocidad de trepada máxima, con lo cual, nunca llega a exigirle el máximo a los motores. Teniendo en cuenta esto, podemos admitir que los valores de la simulación son muy fieles a la realidad.

En cuanto a la configuración de 1,9kg, podemos ver la comparación en la tabla 6.2.

	1´9kg Simulacion	1´9kg Real	concordancia (%)
Autonomia (min)	11,4	10,5	92,1
Consumo medio (A)	16,44	18	91,3
consumo de pico (A)	78,06	66	84,6
Empuje especifico (gr/W)	7,3	6,9	94,5

Tabla 6.2: Comparación de datos reales contra simulados para 1´9kg.

Las conclusiones que podemos sacar de la tabla 6.2 son completamente análogas a las que sacamos para la tabla 6.1

7-Trabajos futuros.

Hay muchos trabajos que desarrollar a raíz de este, pero se han seleccionado 3 que resultan especialmente interesantes como continuación de este proyecto.

7.1-Optimización de eficiencia en configuración coaxial.

Actualmente, la desventaja por menor eficiencia en los multicopteros coaxiales hace que no siempre se puedan aprovechar las virtudes de estos. Es lógico que, al ser aún una tecnología reciente, no se haya estudiado en profundidad como mitigar esto, pero resultaría de gran interés estudiar soluciones que permitan que los multirrotores coaxiales se acerquen en eficiencia a los multirrotores planos, esto podría conseguirse usando hélices con una geometría específica preparada para esta disposición, o tal vez introduciendo los rotores en una carcasa que permita dirigir mejor el aire. En cualquier caso, podría estudiarse en profundidad donde están estas pérdidas y tratar de eliminarlas.

7.2-Aprovechamiento real de la motorización redundante.

El que un RPAS tenga una motorización redundante le otorga un nivel de seguridad mucho más alto que si no la tiene, y resulta por tanto una propiedad muy atractiva. Sin embargo, las placas controladoras actuales no aprovechan esta característica en la mayoría de los casos. Por ejemplo, si el multirrotor pierde una hélice completa, o el conexionado de un motor se rompe, sin producir ningún cortocircuito, la placa es capaz de usar la capacidad redundante, pero en realidad le está mandando una señal de control al variador correspondiente, como intentando controlar ese motor fantasma. Si nos salimos de problemas como esos, y la casuística es amplia, la placa no será capaz de controlar el aparato con un motor menos, aunque físicamente el aparato podría volar. Esto se debe a que la placa no es capaz de saber cuando debería volar con un motor menos y desconectarlo activamente. Pongamos dos ejemplos en los que el aparato perdería el control:

- Si por un impacto se rompe una hélice, de forma que se pierde una pala y la otra no, las vibraciones superarán el valor máximo admisible para la placa y esta perderá el control del aparato. Si hubiera un sistema capaz de detectar esto y desconectar el motor, el aparato volvería a ser totalmente controlable.
- Si en alguno de los motores se produce un cortocircuito, este provocará daños severos en la batería, produciendo probablemente la pérdida de control del aparato por defecto de potencia para los demás motores. Este problema ocurrió con el DRONEY6.04, y no sirvió la motorización redundante. Sin embargo, si un sistema detecta un consumo excesivo en un motor, y lo cataloga como cortocircuito, podría cortar la alimentación a ese motor, y el aparato volvería a ser controlable.

Por todo esto, para que realmente se pudiera aprovechar la motorización redundante, habría que equipar el dron con un sistema capaz de actuar como ayuda a la placa de control principal, desconectando motores problemáticos.

7.3-Uso de baterías primarias.

Las baterías primarias son aquellas que no permiten recargas, una vez usadas, se tiran en un contenedor de reciclaje y se usan unas nuevas.

Puede parecer que este tipo de baterías no tienen ninguna utilidad para RPAS, pero hay situaciones especiales en las que estas baterías resultarían de gran interés, por ejemplo, si se desarrolla un RPAS no recuperable, no necesitamos baterías recargables, y las primarias son más baratas y requieren menos mantenimiento, además existen baterías primarias de litio con densidades de carga superiores a las recargables, lo cual les suma un punto a favor. No hace falta un RPAS no recuperable para considerar estas baterías, ya que otra ventaja que tienen es que mantienen más del 80% de su capacidad después de hasta 10 años almacenadas, imaginemos que queremos tener un dron almacenado para usar solo en casos de emergencia, no tendría sentido estar pendiente del mantenimiento de unas baterías que esperamos no tener que utilizar, en un caso así, volverían a ganar puntos las baterías primarias. Por último, imaginemos unos drones de aplicaciones militares en campo, donde no hay posibilidad de cargar baterías, por todas las ventajas comentadas anteriormente, volvería a ser más interesante el uso de las baterías primarias.

Resultaría por tanto interesante estudiar como usar este tipo de tecnología en un dron como el tratado en este proyecto para posibles aplicaciones como las recién descritas.

8-conclusiones.

- Es posible fabricar de forma artesanal un RPAS de capacidades similares a los RPAS comerciales.
- Los datos extraídos por simulación son altamente fiables, por tanto, es interesante utilizar esta herramienta en la fase previa al diseño para probar diferentes componentes y configuraciones.
- Las ventajas ofrecidas por configuraciones de 6 motores o más en cuanto a redundancia están limitadas por las placas de control, por tanto, esta ventaja pierde fuerza hasta que se aprovechen mejor esas cualidades.
- Las características de diseño se han cumplido con éxito.
- Utilizar una herramienta de diseño en 3D como Catia no es imprescindible para diseñar un dron, pero acelera el proceso de diseño y ayuda a dar mejores soluciones.
- La mayor parte del tiempo necesario para diseñar y fabricar un aparato como el tratado en este proyecto se emplea en ensayos en taller.
- Los multicopteros han supuesto una revolución tecnológica por su simplicidad.

9-Bibliografía.

- El gran libro de Catia. Autor: Eduardo Torrecilla Insagurbe.
- Aprender Catia con ejercicios. Diseño en contexto. Autor: Juan Rivas Lagares
- Applied Catia V5. Autor: Scott L. Hansen
- www.dronevibes.com
- www.rcgroups.com
- www.aeroquad.com
- www.dronethusiast.com
- www.diydrones.com
- www.thingiverse.com
- www.dji.com/es
- www.ecalc.ch
- <https://fpvmania.es/>