

# Trabajo de Fin de Grado

## Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio, desarrollo y construcción de un dron de tipo  
“quadcopter”

Autora: Elena Acal Cordero

Tutora: Juana María Martínez Heredia

Dpto. de Ingeniería Electrónica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024





Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Estudio, desarrollo y construcción de un dron de tipo “quadcopter”**

Autora:

Elena Acal Cordero

Tutora:

Juana María Martínez Heredia

Profesora Contratada Doctora

Dpto. de Ingeniería Electrónica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo de Fin de Grado: Estudio, desarrollo y construcción de un dron de tipo “quadcopter”

Autora: Elena Acal Cordero

Tutora: Juana María Martínez Heredia

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

Me gustaría agradecer, en primer lugar, a Juana, por su infinita paciencia durante este largo periodo de tiempo y por haberme guiado a lo largo de todo el proyecto. Además, gracias a ella y a su labor docente, este trabajo cobrará aún más sentido al permitirme difundir los conocimientos aquí adquiridos a los alumnos que, cada curso, cuentan con el privilegio de poder participar en los distintos proyectos prácticos relacionados con la Ingeniería Electrónica y el campo aeroespacial que se llevan a cabo dentro del Departamento de Ingeniería Electrónica.

Me gustaría dar las gracias, en segundo lugar, a mis padres, por haberme acompañado muy de cerca todos estos duros años de carrera y, sobre todo, por haberme animado y empujado con mucho entusiasmo hacia la finalización de este Trabajo de Fin de Grado.

Por último, agradecer a Javi por haberme proporcionado la inspiración y conocimientos suficientes para desarrollar este trabajo, aportándome seguridad en cada decisión tomada y sirviéndome de apoyo y guía durante la realización del mismo.

*Elena Acal Cordero*

*Sevilla, 2024*





# Resumen

---

Desde hace unos años, se invita a los alumnos del Grado en Ingeniería Aeroespacial a participar en proyectos prácticos voluntarios dentro del Departamento de Ingeniería Electrónica, asociados a la asignatura obligatoria de Ingeniería Electrónica. Esta asignatura es cuatrimestral, obligada a ser cursada por los estudiantes de todas las menciones de dicho Grado durante el tercer curso, y está coordinada, también desde hace años, por la profesora Juana María Martínez Heredia. Entre dichos proyectos voluntarios se encuentra el diseño e implementación de drones, tanto de ala rotatoria como de ala fija. Los primeros drones dentro de esta actividad fueron construidos en el curso 2018/2019, mostrando la idoneidad de una actividad como esta para los futuros graduados por el conocimiento práctico que adquieren y porque desarrollan otro tipo de habilidades de las llamadas “soft skills” (creatividad, capacidad de colaboración, capacidad de adaptación, etc.). Sin embargo, la falta de una guía básica de conocimiento sobre este tipo de vehículos dificulta el progreso de los alumnos, generando dudas que suelen derivar en sobrecostos y errores en la construcción de estos.

Con todo ello, este trabajo cubre la selección de la morfología, la elección de los componentes, la determinación de las capacidades, el ensamblaje y la configuración previa al vuelo de un dron de tipo “quadrotor” como ejemplo práctico, sirviendo como guía de referencia exhaustiva para aportar el know-how necesario para llevar a cabo este tipo de actividades de la manera más eficiente posible.

Además, a lo largo del documento se recopilan consejos, recomendaciones y resultados obtenidos en base a la experiencia de la construcción de drones de tipo quadrotor que no sólo facilitarán el aprendizaje a los usuarios, sino que los dotarán de información práctica útil que sería difícil encontrar en otras fuentes.



# Abstract

---

For several years now, students enrolled in the Aerospace Engineering Degree have been invited to participate in voluntary practical projects within the Department of Electronic Engineering, associated with the mandatory course in Electronic Engineering. This semester-long course is required for all specializations of the degree during the third year and has been coordinated for many years by Professor Juana María Martínez Heredia. One of these voluntary projects is the design and implementation of drones, including both rotary-wing and fixed-wing types. The first drones framed in this activity were constructed during the 2018/2019 academic year, demonstrating the suitability of such an activity for future graduates due to the practical knowledge they acquire and the development of various soft skills such as creativity, collaboration, adaptability, and others. However, the lack of a basic knowledge guide on these types of vehicles hinders students' progress, leading to uncertainties that often result in budget restrictions not being met and in development errors.

With that in mind, this work covers the choice of morphology, the components' selection, the determination of performance capabilities, the assembly and pre-flight configuration of a quadrotor drone as a practical example, serving as a comprehensive reference guide that provides the necessary know-how to carry out such activities as efficiently as possible.

Furthermore, throughout the document, directives, recommendations, and results obtained from the lessons learnt from building quadrotor drones are compiled. These not only facilitate user learning but also provide practical information that would be difficult to find in other sources.



# Índice

---

Agradecimientos .....	vii
Resumen .....	ix
Abstract .....	xi
Índice .....	xiii
Índice de Figuras .....	xv
<b>1 Introducción .....</b>	<b>19</b>
<b>2 Motivación.....</b>	<b>21</b>
<b>3 Estudios previos y Estado del Arte .....</b>	<b>23</b>
3.1 <i>Definición y tipologías de “dron”</i> .....	23
3.1.1 Clasificación por tipo de ala .....	24
3.1.2 Clasificación según su utilidad .....	26
3.1.3 Clasificación según su modo de manejo .....	27
3.2 <i>Terminología y componentes básicos de los drones</i> .....	27
3.3 <i>Misiones típicas de los drones</i> .....	28
3.4 <i>Marco regulatorio de los drones en España</i> .....	29
3.5 <i>Historia del dron y vanguardia</i> .....	31
<b>4 Diseño y selección de componentes .....</b>	<b>35</b>
4.1 <i>Selección de la tipología</i> .....	35
4.2 <i>Fundamentos del quadrotor</i> .....	35
4.3 <i>Selección de componentes</i> .....	36
4.3.1 Carcasa .....	36
4.3.2 Motores .....	36
4.3.3 Hélices.....	38
4.3.4 ESCs.....	38
4.3.5 Batería .....	39
4.3.6 Controlador de vuelo.....	40
4.3.7 Telemetría .....	40
4.3.8 GPS.....	41
4.3.9 Controlador remoto .....	41
<b>5 Instrucción técnica de ensamblaje .....</b>	<b>45</b>
5.1 <i>Tren de aterrizaje</i> .....	47
5.2 <i>Brazos</i> .....	48
5.3 <i>Batería</i> .....	50
5.4 <i>Pixhawk</i> .....	51

5.5	GPS .....	51
5.6	Telemetría.....	54
5.7	Receptor del mando .....	54
5.8	Motores.....	55
5.9	ESCs .....	56
5.10	Hélices .....	57
5.11	Fijación de la tornillería.....	58
5.12	Cableado .....	58
<b>6</b>	<b>Configuración y calibración del dron previa al vuelo .....</b>	<b>61</b>
6.1	Firmware.....	61
6.2	Fuselaje .....	62
6.3	Sensores de orientación .....	63
6.4	Brújulas .....	64
6.5	Giróscopo .....	65
6.6	Acelerómetro .....	66
6.7	Horizonte de nivel.....	67
6.8	Sistema de radiocontrol .....	68
6.9	Batería.....	72
6.10	ESCs .....	72
6.11	Motores.....	73
<b>7</b>	<b>Análisis de actuaciones .....</b>	<b>75</b>
7.1	Caracterización previa del dron.....	75
7.1.1	Peso del dron .....	75
7.1.2	Geometría del dron .....	76
7.2	Atmósfera Estándar Internacional (ISA) .....	76
7.3	Análisis de las actuaciones del dron.....	78
7.3.1	Velocidad máxima de ascenso .....	78
7.3.2	Velocidad máxima de desplazamiento horizontal.....	84
7.3.3	Techo de vuelo .....	89
7.3.4	Alcance .....	91
<b>8</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras .....</b>	<b>95</b>
	Referencias.....	97
	Anexo I. Códigos MATLAB .....	101

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Ilustración 1. REAPER – UAV controlado en remoto (RPA)	24
Ilustración 2. X-47B Unmanned Combat Air Vehicle (UCAS) – UAV autónomo	24
Ilustración 3. Dron de ala fija	25
Ilustración 4. Dron de ala rotatoria (monorrotor)	26
Ilustración 5. Drones de ala rotatoria (multirrotor)	26
Ilustración 6. Conceptos de altitud, altura y elevación	28
Ilustración 7. Zonas habilitadas para el vuelo de drones – Sevilla	30
Ilustración 8. Ornitóptero de Leonardo da Vinci	32
Ilustración 9. Globos sobrevolando la ciudad de Venecia (julio 1849)	32
Ilustración 10. GB-4 ( <i>Robin</i> )	33
Ilustración 11. Predator MQ-1	34
Ilustración 12. Taxi aéreo autónomo	34
Ilustración 13. Carcasa S500	36
Ilustración 14. Motor SunnySky x2814 1000 KV	37
Ilustración 15. Hélice APC 11*5.5 (inch)	38
Ilustración 16. ESC 40A	39
Ilustración 17. Batería LiPo RC 3S (11.1V) 40C 8000mAh	39
Ilustración 18. Pixhawk PX4 PIX 2.4.8	40
Ilustración 19. Telemetría 433/915 MHz	40
Ilustración 20. GPS ODCAY NEO-M8N	41
Ilustración 21. FlySky i6X y FlySky IA6B	42
Ilustración 22. Canales de control para modo de vuelo “Position”	43
Ilustración 23. Sistema OSD	45
Ilustración 24. Tornillería y colocación en carcasa S500	46
Ilustración 25. Montaje del tren de aterrizaje	47
Ilustración 26. Ensamblaje de la placa de suministro de energía	48
Ilustración 27. Colocación de los brazos	49
Ilustración 28. Montaje del cuerpo del dron	49
Ilustración 29. Colocación de la estructura soporte de la batería	50
Ilustración 30. Anclaje de la batería	50

Ilustración 31. Colocación del Pixhawk	51
Ilustración 32. Posicionamiento del mástil del GPS	52
Ilustración 33. Elementos que componen el mástil del GPS y tornillería	52
Ilustración 34. Colocación del cuerpo del GPS	53
Ilustración 35. Anclaje del botón de armado y del buzzer	53
Ilustración 36. Posicionamiento del módulo de vuelo de la telemetría	54
Ilustración 37. Colocación del módulo receptor del mando de vuelo	55
Ilustración 38. Montaje de los motores	56
Ilustración 39. Colocación de los ESCs	56
Ilustración 40. Ensamblaje de las hélices	57
Ilustración 41. Posicionamiento de las hélices	57
Ilustración 42. Determinación del borde de ataque de la hélice	58
Ilustración 43. Diagrama de cableado	59
Ilustración 44. Firmware	61
Ilustración 45. Instalación del firmware	62
Ilustración 46. Definición del fuselaje	62
Ilustración 47. Determinación del ángulo de guiñada	63
Ilustración 48. Configuración de los sensores de orientación	63
Ilustración 49. Calibración de las brújulas	64
Ilustración 50. Procedimiento de calibración de las brújulas	65
Ilustración 51. Calibración del giróscopo	65
Ilustración 52. Proceso de calibración del giróscopo	66
Ilustración 53. Calibración del acelerómetro	66
Ilustración 54. Procedimiento de calibración del acelerómetro	67
Ilustración 55. Proceso de calibración del horizonte de nivel	68
Ilustración 56. Vista de vuelo – Brújula y horizonte de vuelo	68
Ilustración 57. Módulo receptor con cable de enlazado	69
Ilustración 58. Mando transmisor	69
Ilustración 59. Calibración del sistema de radiocontrol	70
Ilustración 60. Configuración del modo del mando transmisor	70
Ilustración 61. Proceso de calibración del sistema de radiocontrol	70
Ilustración 62. Proceso de configuración de los modos de vuelo	71
Ilustración 63. Configuración de los parámetros de la batería	72
Ilustración 64. Proceso de calibración de los ESCs	73
Ilustración 65. Proceso de calibración de los motores	74
Ilustración 66. Vista en planta del dron	76
Ilustración 67. Evolución de la temperatura del aire con la altitud en la troposfera – modelo ISA	77
Ilustración 68. Evolución de la presión del aire con la altitud en la troposfera – modelo ISA	78
Ilustración 69. Evolución de la densidad del aire con la altitud en la troposfera – modelo ISA	78



Ilustración 70. Velocidad máxima de giro de las hélices	79
Ilustración 71. Equilibrio de fuerzas verticales sobre el dron	80
Ilustración 72. Empuje máximo de cada motor	81
Ilustración 73. Empuje máximo como función de la altitud – sin sistema de misión	82
Ilustración 74. Empuje máximo como función de la altitud – con sistema de misión	82
Ilustración 75. Velocidad máxima de ascenso como función de la altitud – sin sistema de misión	83
Ilustración 76. Velocidad máxima de ascenso como función de la altitud – con sistema de misión	83
Ilustración 77. Vuelo horizontal del dron	84
Ilustración 78. Empuje del dron como función del ángulo de balanceo – sin sistema de misión	85
Ilustración 79. Empuje del dron como función del ángulo de balanceo – con sistema de misión	86
Ilustración 80. Ángulo de balanceo máximo como función de la altitud – sin sistema de misión	87
Ilustración 81. Ángulo de balanceo máximo como función de la altitud – con sistema de misión	87
Ilustración 82. Velocidad máxima de desplazamiento horizontal como función de la altitud – sin sistema de misión	88
Ilustración 83. Velocidad máxima de desplazamiento horizontal como función de la altitud – con sistema de misión	88
Ilustración 84. Consumo como interpolación cuadrática	90
Ilustración 85. Alcance como función del ángulo de balanceo – sin sistema de misión	91
Ilustración 86. Alcance como función del ángulo de balanceo – con sistema de misión	92
Ilustración 87. Velocidad de desplazamiento horizontal como función del ángulo de balanceo – sin sistema de misión	92
Ilustración 88. Velocidad de desplazamiento horizontal como función del ángulo de balanceo – con sistema de misión	93



# 1 INTRODUCCIÓN

---

El objetivo de este trabajo consiste en el diseño, selección de componentes, análisis de actuaciones, ensamblaje y configuración previa al vuelo de un dron de tipo quadrotor, así como la elaboración de toda la documentación asociada, en el marco de las actividades propuestas en la asignatura de Ingeniería Electrónica del Grado en Ingeniería Aeroespacial.

De esta forma, se tratará de elaborar, por un lado, un análisis comprensivo de todos los aspectos necesarios para construir y volar un dron partiendo desde cero, que puede servir como guía de referencia para futuros alumnos que se dispongan a realizar estas tareas y como punto de partida y unificación de criterios para profesores que traten de explicar temas referentes a esta materia. Por otro lado, se realizará un análisis cuantitativo de las actuaciones de vuelo de un quadrotor tipo, basado en el modelo construido, de cara a proporcionar un marco de referencia para el análisis de las capacidades de este tipo de drones.

Con todo ello, este documento comienza con una justificación de las diferentes motivaciones que dan raíz al mismo y los usos que puede tener a nivel tanto didáctico como práctico. Acto seguido, se presenta un estudio y un análisis de los distintos tipos de drones, todo ello enmarcado en la normativa actual, así como una presentación de la evolución del dron desde sus orígenes, desembocando en una revisión del estado del arte actual. A continuación, se detalla y se describe la tipología de dron sobre la que se va a realizar el trabajo, describiendo el proceso de selección de componentes y elaborando una instrucción técnica de ensamblaje detallada para conocer los distintos pasos necesarios para montar este tipo de dron, así como un manual de vuelo para poder configurarlo y volarlo<sup>1</sup>. Posteriormente, se presenta un estudio de las actuaciones de vuelo del quadrotor previamente configurado para poder determinar las capacidades de este. Finalmente, se aportan las conclusiones extraídas de la realización del trabajo y una serie de propuestas para el desarrollo futuro del mismo.

---

<sup>1</sup> Es necesario tener en cuenta que, para volar un dron de las características descritas en este trabajo, se ha de poseer una licencia de piloto de drones y realizar un análisis de la zona de vuelo, tal y como se mencionará más adelante.



## 2 MOTIVACIÓN

---

Desde hace unos años, se toma la iniciativa en la asignatura de Ingeniería Electrónica del Grado en Ingeniería Aeroespacial de permitir que algunos alumnos participen voluntariamente en distintos proyectos prácticos relacionados con la Ingeniería Electrónica y el campo aeroespacial. Uno de estos proyectos, cada vez más recurrente, suele consistir en el montaje, reparación o vuelo y adaptación a diferentes aplicaciones de drones de distintos tipos, tanto de ala fija como de ala rotatoria, y, específicamente, se suele tratar con drones de tipo quadrotor.

Pese a la gran utilidad didáctica de esta actividad, la falta de una documentación específica y detallada sobre las tareas realizadas merma en ocasiones el progreso de los alumnos, que se ven obligados a comenzar cada proyecto de la nada, lo que generalmente radica en sobrecostos, plazos demasiado largos (a veces, incluso para realizar el proyecto dentro del curso lectivo) o errores en el desarrollo que podrían evitarse fácilmente con una formación previa. Al tratarse de una actividad voluntaria y externa al curso de Ingeniería Electrónica, no se dispone del tiempo necesario para realizar esta formación previa básica para el alumnado.

De esta forma, este documento surge con el objetivo de detallar, de principio a fin, el proceso de diseño, ensamblaje y configuración para el vuelo de un dron, complementado por el subsecuente análisis de actuaciones, para determinar si el dron configurado es capaz o no de realizar las misiones establecidas por diseño.

Para ello, se han identificado las siguientes necesidades a las que dar respuesta:

- 1) Selección de la morfología
- 2) Elección de los componentes necesarios, sus características y la relevancia en la determinación de las capacidades
- 3) Determinación de las capacidades y actuaciones
- 4) Ensamblaje
- 5) Preparación para el vuelo

Se han elaborado, respectivamente, los siguientes capítulos:

- 1) Historia y estudio del arte de drones y de las distintas morfologías existentes, y análisis del marco legal
- 2) Revisión de los componentes típicos para drones y sus características. Muestra de los elementos seleccionados para configurar el dron y motivo de selección de cada uno
- 3) Análisis de las actuaciones del dron modelo
- 4) Instrucción de ensamblaje detallada, incluyendo manual de montaje, cableado (esquemático) y configuración de componentes
- 5) Manual de vuelo básico para despegar y aterrizar el dron de forma segura

De forma que puede servir como guía de referencia, extensiva y detallada para todo el proceso de selección y ensamblaje de un dron.



# 3 ESTUDIOS PREVIOS Y ESTADO DEL ARTE

---

El objetivo de este capítulo es explorar la información disponible en distintos medios bibliográficos para determinar, analizar y exponer los principales conceptos que son necesarios conocer de manera previa al desarrollo de cualquier proyecto o trabajo con drones.

En primer lugar, se expondrá la definición de las aeronaves popularmente conocidas como “drones” y se explicarán las diferencias entre los distintos tipos de aeronaves que suelen clasificarse como tal. A continuación, se definirá una serie de conceptos empleados comúnmente al trabajar con drones, incluyendo una breve descripción de los elementos básicos que componen un dron. Posteriormente, se estudiará qué tipo de misiones suelen concebirse como objetivo para los drones según su tipología y qué función tienen los drones en la sociedad actual, y se resumirá el marco regulatorio de normativa de referencia aplicable en España para la operación y desarrollo de drones. Finalmente, se presentará un breve recorrido por la historia del dron, desde sus orígenes hasta la vanguardia actual.

## 3.1 Definición y tipologías de “dron”

La palabra “dron” proviene del inglés “drone”, que significa abeja macho (zángano o abejorro). De igual forma, este término puede encontrarse también como verbo y hace referencia a la acción del “zumar de las abejas”, que puede relacionarse con el sonido tan peculiar y conocido que emiten los drones al volar [1].

De forma general, en el campo aeroespacial, se suele emplear el término dron para referirse a cualquier tipo de aeronave no tripulada, es decir, aquella en la que no se encuentra a bordo ningún piloto u operador (en caso de existir uno). Sin embargo, desde un punto de vista técnico, resulta necesario diferenciar entre distintos tipos de aeronaves no tripuladas [1]:

- 1) UAV (Unmanned Aerial Vehicle): se utiliza este término para referirse a cualquier vehículo aéreo no tripulado que es controlado en remoto por un piloto o mediante un programa informático, por lo que es un término más global que incluye tanto a las aeronaves no tripuladas programables como a los RPA. Surge dentro del término UAV una variación conocida como UAS (Unmanned Aircraft System) que incluye tanto a la aeronave no tripulada como a todos los elementos necesarios para su operación, es decir, el término UAS abarca el UAV, la estación de control en tierra (si la hubiese), los enlaces de comunicación y cualquier otro equipo necesario para la operación segura y eficaz de la aeronave.
- 2) RPA (Remotely Piloted Aircraft): se emplea este concepto para referirse a cualquier aeronave no tripulada que necesita ser controlada de manera remota por un piloto a una cierta distancia, a diferencia de otras que pueden programarse y ejecutar sus acciones de manera autónoma. De manera análoga a lo que ocurre entre UAV y UAS, surge dentro del término RPA una variación conocida como RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) que incluye tanto a la aeronave como al enlace de comunicaciones y la estación en tierra desde donde se la controla, por lo que se trata de un sistema y no de un vehículo aéreo como tal.



Ilustración 1. REAPER – UAV controlado en remoto (RPA)

Imagen extraída de [2]



Ilustración 2. X-47B Unmanned Combat Air Vehicle (UCAS) – UAV autónomo

Imagen extraída de [3]

Los drones poseen diferentes formas de clasificación, en función de distintos factores y características. Se describen, a continuación, algunas de ellas en base a [4]:

### 3.1.1 Clasificación por tipo de ala

- 1) Ala fija: la característica principal de los drones de ala fija es que no poseen hélices que generen sustentación de manera directa. Además, su forma aerodinámica les otorga la capacidad de aprovechar el viento y ser capaces de mantenerse en el aire de manera estable. Debido a ello, son empleados para realizar mapeos de superficies extensas. Sin embargo, la principal desventaja de este tipo de drones es que son poco maniobrables en su vuelo en espacios cerrados o reducidos.





Ilustración 3. Dron de ala fija

Imagen extraída de [5]

- 2) Ala rotatoria: este tipo de drones se clasifican en función del número de hélices o rotores que poseen.
  - a) Monorrotores: también conocidos como helicópteros o drones coaxiales, poseen un solo rotor principal montado en la parte superior y, en algunos diseños, cuentan con un rotor de cola más pequeño para lograr estabilidad y control. Son más pequeños y livianos, lo que los convierte en ágiles y maniobrables en espacios reducidos.
  - b) Tricópteros (tres hélices): poseen tres rotores verticales y, por lo general, son económicos, fáciles de reparar y poseen funciones bastante simples. Debido a ello, suelen ser utilizados por aficionados y principiantes.
  - c) Cuadricópteros (cuatro hélices): también denominados quadcopters o quadrotores, son drones propulsados por cuatro hélices. Poseen mayor potencia de elevación y estabilidad que los tricópteros, además de ser capaces de volar en cualquier dirección. Es por ello por lo que se les otorgan funciones más complejas y profesionales (como fotografías o grabaciones de películas, por ejemplo).
  - d) Hexacópteros (seis hélices): cuentan con seis rotores dispuestos de manera circular, lo que les dota de gran estabilidad y permite que sus movimientos durante el vuelo sean muy eficientes. Estos drones son más grandes y complejos, por lo que son menos económicos y su reparación es más costosa (tanto a nivel técnico como económico).
  - e) Octocópteros (ocho hélices): poseen ocho hélices que funcionan simultáneamente, lo que les otorga una mayor rapidez, capacidad de vuelo y estabilidad con respecto a los drones mencionados anteriormente. Debido a sus características, tienen la capacidad de grabar videos o realizar fotografías con mucha estabilidad y calidad. Además, cuentan con la ventaja de ser capaces de llevar cargas útiles de bastante peso, así como poder continuar el vuelo de manera estable si alguna de las hélices llegara a dañarse.



Ilustración 4. Dron de ala rotatoria (monorrotor)

Imagen extraída de [6]



Ilustración 5. Drones de ala rotatoria (multirrotor)

Imagen extraída de [4]

Tal y como se presentará en el siguiente capítulo, el dron seleccionado para este trabajo es de tipo quadcopter y se emplearán indistintamente los términos dron y quadrotor para referirse a él.

### 3.1.2 Clasificación según su utilidad

- 1) Drones para uso civil: este tipo de drones se emplean en una gran variedad de tareas comerciales, científicas y recreativas, tales como la fotometría (para realizar mapeos en zonas extensas o para alcanzar espacios de difícil acceso, por ejemplo), la grabación de películas, la minería, la agricultura o la atención de emergencias y desastres, entre otros.
- 2) Drones para uso militar: este tipo de drones están diseñados de manera específica para ser utilizados por las fuerzas armadas en una amplia variedad de operaciones desde la vigilancia hasta el combate.

### 3.1.3 Clasificación según su modo de manejo

- 1) Drones semiautomáticos: son aquellos en los que el operador posee el control principal de las funciones del dron, pero recibe la ayuda de los sistemas GPS, los giróscopos y demás sistemas de seguridad del dron.
- 2) Drones automáticos: son aquellos en los que el operador realiza una programación previa de la misión que llevará a cabo el dron posteriormente (como si se tratase del piloto automático de una aeronave) y, durante la ejecución de la misión, tan solo ha de prestar asistencia en caso de emergencia.
- 3) Drones autónomos: son aquellos capaces de tomar decisiones por sí solos, apoyándose en tecnologías como la inteligencia artificial. En estos casos, la presencia de un operador no es necesaria.

## 3.2 Terminología y componentes básicos de los drones

A continuación, se definen de manera breve una serie de términos asociados a las características morfológicas y a las actuaciones de los drones (y de cualquier tipo de aeronave en general) que es necesario conocer y que serán empleados a lo largo de este trabajo [7]:

- 1) Empuje: se define como la fuerza vertical que ejercen las hélices sobre el dron y que le permiten mantenerse en el aire, en el caso de los drones de ala rotatoria, y como la fuerza de tracción que genera la hélice y que propulsa el dron hacia delante, en el caso de los drones de ala fija.
- 2) Autonomía: se define como el tiempo total de duración de la batería del dron.
- 3) Alcance: se define como la distancia horizontal máxima total que es capaz de recorrer el dron sin que se agote la batería, considerando que el dron ha de regresar de manera controlada a su punto de partida.
- 4) Altitud: se define como la distancia vertical a la que se encuentra el dron, tomando como referencia el nivel del mar.
- 5) Altura: se define como la distancia vertical a la que se encuentra el dron, tomando como referencia la superficie terrestre que se encuentra directamente bajo este.
- 6) Elevación: se define como la altitud del terreno en un punto concreto.

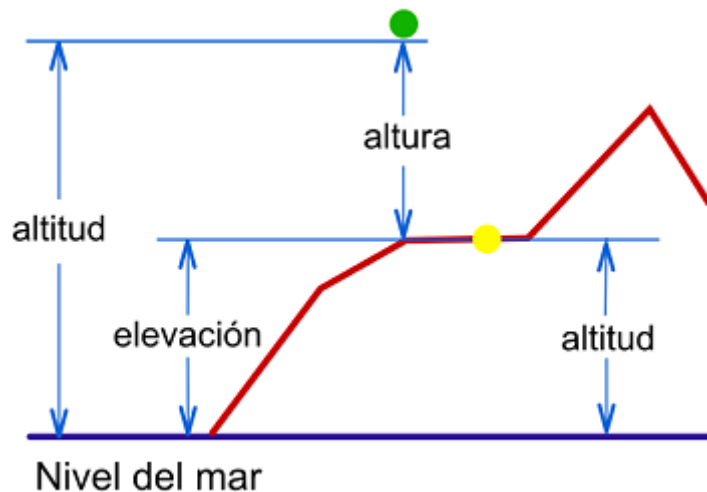


Ilustración 6. Conceptos de altitud, altura y elevación

Imagen extraída de [8]

- 7) Techo de vuelo: se define como la altitud máxima a la que es capaz de elevarse el dron. Este concepto será desarrollado de manera más detallada en el capítulo 7.
- 8) Ángulo de balance: se define como el ángulo que forma el plano de las hélices del dron con el plano horizontal. Este concepto será desarrollado de manera más detallada en el capítulo 7.

Con respecto a las características morfológicas principales de un dron, este se compone de una estructura, una planta propulsora, un sistema de almacenamiento de energía y un ordenador de vuelo, así como de algún sistema de control (bien remoto o autónomo). Todos estos elementos serán descritos y se detallará la configuración general del dron objeto de este trabajo en el capítulo 4.

### 3.3 Misiones típicas de los drones

Los drones presentan una serie de ventajas frente a otros vehículos aéreos tradicionales en una amplia variedad de situaciones. Así, una de sus principales ventajas es la capacidad de ser portador de sistemas de misión para conseguir llevar dichos sistemas bien de manera económica a distintos lugares, bien a lugares de difícil acceso, todo ello sin la necesidad de realizar un gran despliegue de medios.

En el caso de transporte de sistemas a lugares difíciles de acceder, se presentan a continuación distintas misiones tipo:

- Inspección de defectos en lugares de pequeño tamaño y con recovecos, así como en instalaciones de gran altura (como, por ejemplo, tuberías instaladas en plantas de producción, infraestructuras eléctricas o aerogeneradores).
- Aplicación de pintura en zonas de difícil acceso o localizadas a cierta altura, como ocurre en el caso de aeronaves.
- Inspección y reconocimiento en zonas accidentadas (como cadenas montañosas, cuevas o lugares de accidentes tales como terremotos o derrumbamientos, por ejemplo).

- En territorios en guerra, gracias a su poca capacidad para ser detectados y su pequeño tamaño, se emplean drones tanto con fines de reconocimiento con cámaras como de transporte de elementos sensibles (de información o comunicaciones) e incluso con fines tácticos de ataque portando armamento.
- Inspección de interiores de edificios y de obras en construcción, sin tener la necesidad de acceder físicamente a estos lugares que pueden tener una integridad comprometida.
- Detección y extinción de incendios de difícil acceso.

En el caso de transporte de sistemas de manera económica, se presentan a continuación distintas misiones tipo:

- En el ámbito de la agricultura, tal y como se presenta en [9], donde se emplean drones para llevar a cabo tareas como regar, fumigar, fertilizar y vigilar, en sustitución de tractores o avionetas utilizados tradicionalmente para cubrir grandes extensiones de terreno, que poseen un coste alto de operación por hora y son poco automatizables. Además, se pueden usar drones para inspeccionar grandes superficies de terreno con el objetivo de detectar de manera temprana enfermedades o defectos en el crecimiento de las plantaciones.
- Para tareas de reparto, puesto que los drones son una alternativa que permite llevar productos de peso medio a lugares específicos mediante navegación autónoma. Esta aplicación se emplea sobre todo en ámbitos industriales, pero todavía queda pendiente afinar la tecnología debido a la seguridad.
- Para tareas de vigilancia y reconocimiento, ya que los drones pueden servir como cámaras de seguridad móviles con capacidad de abarcar grandes superficies, siendo aún más eficaces funcionando en enjambre (para controles de velocidad, por ejemplo).
- Para generar videografía para cine, para creadores de contenidos, etc., sin tener que usar helicópteros, o para tomas extremas de persecución de vehículos en películas.
- En espectáculos de luces, donde se emplean drones como sustitución de los tradicionales fuegos artificiales.
- En el ámbito de la educación, donde los drones permiten formar a estudiantes para que puedan aprender el proceso completo de diseño y ensamblaje de una aeronave, así como herramientas para la programación de leyes de control de vuelo al más bajo nivel.
- Para aficionados al aeromodelismo, que emplean drones para vuelo deportivo o carreras.

En este trabajo, la misión principal del dron es educativa. No obstante, podrá ser equipado con diferentes sistemas de misión para satisfacer otras necesidades futuras.

### 3.4 Marco regulatorio de los drones en España

En España, el organismo que se encarga de regular el uso de drones es la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) y la normativa vigente que regula el uso recreativo y profesional de drones son los Reglamentos Europeos RE 2019/947 y RD 2019/945 [10], estando el primero de ellos destinado a regular los requerimientos

y especificaciones para fabricantes de UAS y el segundo de ellos destinado a regular el uso de los UAS por parte de los operadores y pilotos de drones (tanto recreativos como profesionales). Esta normativa, descrita de manera detallada en [11], se aplica a todas las aeronaves no tripuladas (tanto autónomas como pilotadas en remoto), sin importar su masa ni la utilidad que se les dé, quedando exentos los drones y personal militar, búsqueda y salvamento, policías, agentes de aduanas y control de fronteras, bomberos, guardacostas y demás cuerpos de seguridad y autoridades diversas.

A continuación, se recopilan los requisitos mínimos para volar cualquier dron en España a partir del 31 de diciembre de 2020, explicados detalladamente en [12]:

- 1) Registrarse como operador: todos los usuarios que deseen volar un dron, salvo los exentos nombrados anteriormente, tendrán que registrarse como operadores en la sede electrónica de AESA y obtener el número de operador según la normativa europea, para incluirlo posteriormente en el dron de forma visible.
- 2) Formarse como piloto: todos los usuarios que deseen volar un dron han de tener una formación mínima acreditable, según la categoría operacional en la que vayan a operar.
- 3) Disponer del seguro obligatorio de responsabilidad civil: se ha de tener contratada una póliza de seguro que cubra la responsabilidad civil frente a terceros por daños que puedan surgir durante y por causa de la ejecución de cualquier tipo de vuelo que se realice.
- 4) Conocer las reglas de vuelo: el vuelo de los drones se rige por una serie de reglas generales que están condicionadas por el peso del dron, la presencia de otras personas y la cercanía a edificios, entre otros factores. Se describirán estas limitaciones generales de vuelo al final de este apartado.
- 5) Conocer los lugares habilitados para el vuelo: existen limitaciones al vuelo de drones en algunos lugares debido a diferentes razones (cercanía de aeródromos, zonas militares, protección de infraestructuras críticas, protección medioambiental, etc.). Así, antes de iniciar cualquier vuelo con un dron, es necesario consultar el mapa de zonas habilitadas para el vuelo de drones, disponible en [13].

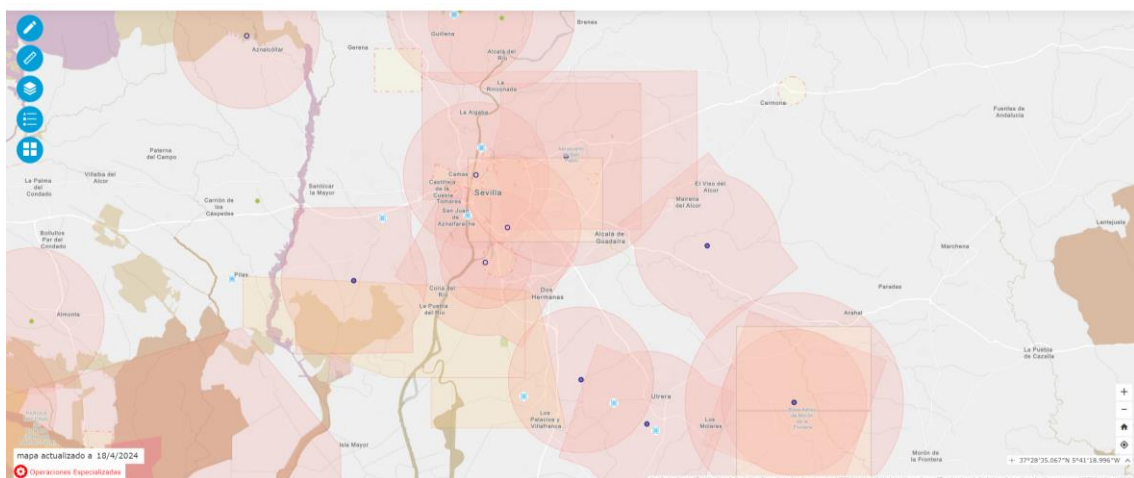


Ilustración 7. Zonas habilitadas para el vuelo de drones – Sevilla

Imagen extraída de [13]

- 6) Poseer un sistema de identificación a distancia directa ("DRI"): todos los usuarios que deseen volar un dron en categoría abierta (A1, A2 y A3) que dispongan de marcado de clase (C1, C2 y C3), así como aquellos que deseen operar en categoría específica (bajo escenario estándar nacional y europeo o bajo autorización), han de contar con un sistema de identificación a distancia directa, que permite la identificación a distancia de una serie de características del dron como, por ejemplo, el número de serie.

Por último, se describen una serie de limitaciones generales a tener en cuenta para el vuelo de drones en base a [10]:

- 1) El dron ha de encontrarse siempre al alcance visual del piloto.
- 2) El dron nunca ha de sobrepasar los 120 metros de altura en vuelo.
- 3) El dron no puede volar a menos de 8 kilómetros de cualquier aeropuerto, aeródromo o espacio aéreo controlado.
- 4) Tal y como se mencionó anteriormente, se ha de disponer de un seguro de responsabilidad civil.
- 5) El dron debe llevar una placa identificativa ignífuga colocada de manera firme en la estructura que contenga datos como el nombre del fabricante, el modelo, el número de serie y los datos de contacto del piloto.
- 6) Resulta necesario proteger el derecho a la intimidad de las personas que pudieran aparecer en imágenes y vídeos captados por el dron, teniendo especial cuidado con su divulgación pública.
- 7) Tal y como se mencionó anteriormente, el piloto ha de poseer la formación necesaria certificada que acredite un mínimo de conocimientos, según las diferentes categorías establecidas.

### 3.5 Historia del dron y vanguardia

Se considera en [14] que el primer dron de la historia fue el ornitóptero de Leonardo da Vinci que, aunque fue concebido finalmente para transportar seres humanos, tuvo un primer desarrollo más pequeño en forma de paloma de madera y con alas de tela que se utilizó para mandar mensajes de todo tipo (mensajes enviados entre trincheras durante las guerras o mensajes enviados de las doncellas a sus novios cuando eran encerradas por sus padres en la alcoba, por ejemplo).



Ilustración 8. Ornitóptero de Leonardo da Vinci

Imagen extraída de [14]

Más adelante, en julio de 1849, los austriacos pusieron en marcha alrededor de doscientos globos aerostáticos no tripulados equipados con bombas que fueron lanzadas sobre la ciudad de Venecia, siendo este evento reconocido como el primer bombardeo aéreo de la historia. Los globos tenían bombas con mecanismos de tiempo, pero debido a los vientos impredecibles, el ataque no fue completamente efectivo [15]. De igual forma, menos de dos décadas después de la Guerra Civil en EE.UU, fuerzas de la Confederación y de la Unión volaron globos para misiones de reconocimiento que permitieron observar los movimientos del enemigo desde una posición elevada, brindando así una ventaja estratégica significativa [16].

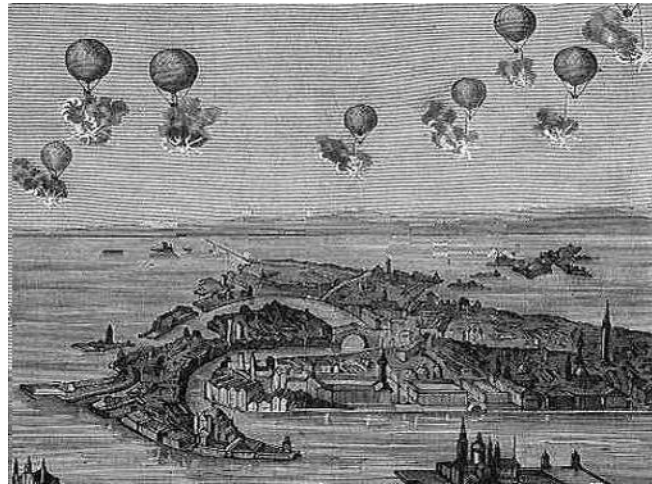


Ilustración 9. Globos sobrevolando la ciudad de Venecia (julio 1849)

Imagen extraída de [15]

Posteriormente, en 1898, surgió la práctica de la vigilancia aérea y el mapeo militar en la Guerra Hispanoamericana cuando los militares estadounidenses equiparon una cometa con una cámara, dando como resultado una de las primeras fotografías de reconocimiento aéreo. La práctica de la vigilancia aérea también fue ampliamente utilizada durante la Primera Guerra Mundial, donde los militares empleaban estas cometas para obtener fotografías aéreas y seguir los movimientos del enemigo formando mapas de situación. Además, fue durante la Primera Guerra Mundial cuando se desarrolló una plataforma de aeronaves sin piloto dotadas de un dispositivo para lanzar torpedos con una catapulta, siendo guiadas con gran precisión y con capacidad de girar y volar hacia abajo en vertical gracias a los avances en la tecnología de control. También durante esta época, la idea de armas guiadas de forma remota fue empleada en el Reino Unido, donde se construyeron una serie de aviones dirigidos por control remoto que fueron equipados con explosivos [17].



No obstante, el desarrollo de las aeronaves no tripuladas no hubiera sido posible sin grandes avances tecnológicos como la radio. Es aquí donde resulta necesario destacar la figura de Nikola Testa, que demostró por primera vez el funcionamiento del mando a distancia o radiocontrol de un vehículo a finales del siglo XIX mediante el control a distancia de un barco con una señal de radio, sentando con ello las bases para la robótica y el control remoto moderno [17].

Durante la Segunda Guerra Mundial, la marina estadounidense lanzó un programa denominado *Operación Anvil* para identificar bunkers alemanes usando bombarderos readaptados para tolerar una capacidad doble de explosivos y siendo guiados por control remoto para estrellarse contra los nazis en Alemania y partes de Francia controladas por Hitler. Sin embargo, la tecnología por control remoto se encontraba muy limitada en este momento y los pilotos tenían que guiar de manera muy precisa cualquier aeronave, lo que provocó el fracaso de este programa [16].

A mediados de 1940, se desarrolló el GB-1, un sistema de bombardeo aéreo ideado para evitar las defensas aéreas alemanas que consistía en un planeador hecho de madera contrachapada equipado con una bomba estándar de unas mil libras de peso y controlado por radio, y en 1943, se desarrolló el GB-4 o *Robin*, que fue la primera arma guiada retransmitida por televisión [14].



Ilustración 10. GB-4 (*Robin*)

Imagen extraída de [14]

No obstante, no fue hasta los años 80 y 90 con el desarrollo profundo en computación y sistemas de control cuando los drones del presente comenzaron a tomar forma. Así, en la década de los 90, el Predator MQ-1 marcó un hito en el uso de los drones tanto para vigilancia como para ataques. Inicialmente, el Predator se desplegó en 1995 como un vehículo no armado de inteligencia, vigilancia y reconocimiento. Sin embargo, a principios de los 2000, fue equipado con misiles AGM-114 Hellfire, otorgándole la capacidad de realizar misiones de ataque de precisión [18].



Ilustración 11. Predator MQ-1

Imagen extraída de [18]

En la actualidad, los drones han trascendido sus orígenes militares y se han convertido en herramientas versátiles y valiosas en numerosos campos civiles y comerciales gracias a los continuos avances tecnológicos, primando los drones cada vez más autónomos, con algoritmos de control muy precisos e inteligentes, con gran estabilidad en vuelo y dotados de cámaras de alta resolución. Así, los avances en tecnología de sensores, navegación GPS y duración de la batería han potenciado el uso de drones en aplicaciones como fotografía y videografía aérea, entrega de paquetes, agricultura de precisión e inspección de infraestructuras, entre otros.

Es en este ámbito donde resulta necesario mencionar a la empresa DJI, fundada en 2006 y considerada líder mundial en la fabricación de drones para uso civil y comercial. DJI ofrece una amplia gama de productos desde drones de consumo (como los modelos Phantom y Mavic) hasta soluciones profesionales para la cinematografía, la agricultura, la inspección de infraestructuras y la seguridad pública, contando con una tecnología avanzada que incluye sistemas de estabilización de cámaras, navegación GPS precisa y capacidades de vuelo autónomo [9].

Por último, resulta interesante mencionar otra tendencia relativa a los drones como son los taxis aéreos autónomos que se encuentran actualmente en desarrollo, aunque aún han de solventarse diversos temas relacionados con la seguridad en vuelo de este tipo de vehículos.



Ilustración 12. Taxi aéreo autónomo

Imagen extraída de [19]

# 4 DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

---

El propósito del siguiente capítulo es describir la tipología de dron sobre la que se ha llevado a cabo este trabajo, así como detallar el proceso de diseño y selección de componentes realizado con el objetivo de conocer las características de cada uno de ellos, el motivo de elección y la relevancia que poseen en la determinación de las capacidades del vehículo.

## 4.1 Selección de la tipología

El principal requisito a la hora de seleccionar la tipología de dron ha sido la capacidad de adaptar el dron para distintos tipos de misión, es decir, la posibilidad de personalización y acondicionamiento al uso final de este. De esta forma, se ha optado por un diseño modular donde todos los sistemas y componentes que lo integran poseen facilidad tanto de modificación como de sustitución por otros nuevos, en caso de ser necesario.

Por otro lado, el nivel de maniobrabilidad y la autonomía también han sido aspectos determinantes a la hora de elegir el tipo de dron, con el fin de poder llevar a cabo multitud de actuaciones de la manera más eficaz posible. Por último, a todo ello hubo que sumarle el presupuesto disponible, siendo un dron de bajo costo el objetivo a alcanzar (no más de unos 200-300 €), así como la disponibilidad en el mercado de cada componente.

Con todo ello, se tomó la decisión de que el vehículo a diseñar y construir tomaría la forma de un quadrotor, que presenta las siguientes características principales:

1. Posee un diseño modular muy versátil, lo que le permite ser particularizado y adaptado para diferentes funcionalidades. Además, un dron personalizado ayuda a comprender de manera más profunda y detallada la tecnología que alberga, permitiendo reparaciones internas en caso de que el vehículo presente comportamientos anómalos.
2. Los costes de diseño y fabricación son más baratos que los de un dron comercial, puesto que en un dron hecho a medida es el propio constructor el que decide y asume los gastos económicos.
3. Tiene una alta maniobrabilidad, esencial para poder llevar a cabo las actuaciones definidas para cada tipo de misión, a diferencia de las aeronaves de ala fija controladas a distancia.
4. Posee una baja dificultad de fabricación, así como una amplia gama de documentación disponible, debido al reciente auge de este tipo de drones.

## 4.2 Fundamentos del quadrotor

Un quadrotor es, tal y como se describió en el capítulo anterior, una aeronave que posee cuatro rotores diferentes posicionados de tal manera que la actitud, la posición y la velocidad del vehículo se pueden controlar utilizando exclusivamente una regulación de empuje independiente para cada rotor, suprimiendo la necesidad de superficies de control que, a su vez, requieren una determinada velocidad de flujo de aire para ser eficientes. Según la posición relativa de los rotores, se pueden tener muchas configuraciones diferentes. En este caso, se ha optado por una disposición en X doblemente simétrica debido a su simplicidad de ensamblaje y tipicidad en el mercado.

Los quadrotores suelen estar alimentados por baterías y utilizan motores de corriente continua sin escobillas gobernados por controladores electrónicos de velocidad denominados ESCs (Electronic Speed Controllers). Para el control de actitud y posición, el dron calcula independientemente qué empuje debe dar cada hélice y, a través de una computadora de vuelo, se ordena al ESC correspondiente que aumente o disminuya las rpm de la hélice asociada para lograr este efecto.

En general, no es posible determinar el empuje exacto de cada rotor para cada rpm, ya que es altamente dependiente de la hélice que se monte y de la velocidad del dron y del flujo de aire externo. Es por ello por lo que suelen incluirse controladores PID (de bucle cerrado) en los algoritmos de control de las computadoras de vuelo para lograr resultados óptimos en el control del vuelo del dron.

## 4.3 Selección de componentes

### 4.3.1 Carcasa

La estructura seleccionada ha sido una carcasa de 500 mm de diagonal con configuración en X doblemente simétrica hecha principalmente de plástico y fibra de carbono. Dicha carcasa trae incorporados planos de potencia y de tierra en la plataforma principal, lo que reduce significativamente el cableado durante el ensamblaje.



Ilustración 13. Carcasa S500

Imagen extraída de [20]

### 4.3.2 Motores

Uno de los parámetros más importantes para la caracterización de motores de corriente continua sin escobillas es la clasificación KV (constante de velocidad;  $1 \text{ KV} = 1 \text{ rpm/voltio}$ ), que suele oscilar entre unos 100 KV para UAV muy grandes hasta 20000 KV para drones pequeños con requisitos de alta maniobrabilidad. Cuanto más bajo es el valor de KV y más grande es la hélice montada, más eficiente es el motor y menos potencia por unidad de empuje se extraerá de la batería, pero más pesado y caro será el conjunto [21]. Así, surge la necesidad de establecer un compromiso entre el costo y la eficiencia energética para seleccionar un motor específico.

En este caso, el modelo de motor seleccionado ha sido el propuesto como referencia para la carcasa, esto es, SunnySky x2814 1000KV, que también se ajustaba al presupuesto disponible y al plazo de entrega requerido.



SUNNYSKY SMART PERFORMANCE WITH COMPETITIVE PRICE		
Specifications	X2814 KV1000	
Stator Diameter	定子外径	28mm
Stator Thickness	定子厚度	14mm
No. of Stator Arms	定子槽数	12
No. of Rotor Poles	转子极数	14
Motor Kv	电机KV值	1000
No-Load Current (A/10V)	空载电流	1A
Motor Resistance	电机电阻	38m
Max Continuous Current	最大连续电流	40A/30S
Max Continuous Power	最大连续功率	600W
Weight	重量 (含长轴)	108g
Rotor Diameter	转子直径	35mm
Shaft Diameter	出轴直径	4mm
Body Length	电机长度	36mm
Overall Shaft Length	电机含轴总长度	54mm
Max Lipo Cell	最大电池节数	3-4S
ESC	建议使用电调	45A
Recommended Prop(inch)	推荐螺旋桨规格	APC13x6.5 APC11x5.5 APC12x6 APC12x8
AEROBATIC(适用特技机重量) 1200g-1400g (3S APC12x6/12x8) (4S APC11x5.5)		
适用3D机重量 800g-1100g (3S APC13x6.5/12x6/12x8)		

X2814 KV1000 拉力参数						
Prop (inch)	Voltage (V)	Amps (A)	Thrust (g)	Watts (W)	Efficiency (g/W)	RPM
APC13x6.5	11.1	5	500	55.5	9.01	3960
		8.6	750	95.46	7.86	4832
		13.2	1000	146.52	6.83	5590
		18.2	1250	202.02	6.19	6203
		24	1500	266.4	5.63	6767
		31	1750	344.1	5.09	7330
		39	2000	432.9	4.62	7760
APC12x6	11.1	46.7	2287	518.37	4.41	7979
		5.4	500	59.94	8.34	4100
		9.3	750	103.23	7.27	5580
		14	1000	155.4	6.44	6290
		19	1250	210.9	5.93	6970
		25	1500	277.5	5.41	7620
		31.5	1750	349.65	5.01	8157
APC12x8	11.1	41.3	2050	458.43	4.47	8687
		5.6	500	62.16	8.04	4205
		9.1	750	101.01	7.43	5061
		15.2	1000	168.72	5.93	5862
		20.4	1250	226.44	5.52	6475
		27.6	1500	308.58	4.86	7044
		35.1	1750	389.61	4.49	7631
APC11x5.5	11.1	44.3	2070	458.39	4.15	8233
		5.6	500	62.16	8.04	5338
		9.55	750	106.005	7.08	6476
		14	1000	155.4	6.44	7438
		19.4	1250	215.34	5.80	8304
	14.8	25.4	1500	291.94	5.32	9014
		29.6	1655	328.56	5.04	9468
		4.4	500	65.12	7.68	5327
		7.5	750	111	6.76	6481
		11	1000	162.8	6.14	7420
	15.2	1250	224.98	5.56	8345	
	19.7	1500	291.56	5.14	8984	
	24.8	1750	367.04	4.77	9652	
	30.2	2000	446.96	4.47	10209	
45.6	2556	674.88	3.79	11676		

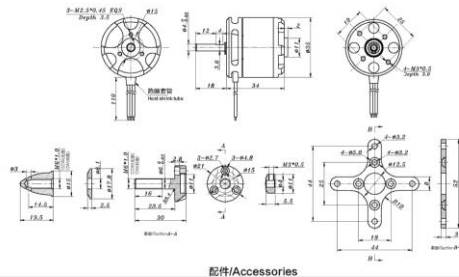


Ilustración 14. Motor SunnySky x2814 1000 KV  
Imagen extraída de [22]

### 4.3.3 Hélices

Una vez seleccionados los motores, se procedió a elegir las hélices. Es importante comprobar que las hélices seleccionadas no van a colisionar entre sí por cercanía.

Un aspecto importante en la selección de la hélice es determinar el diámetro máximo. Para ello, se han tenido en cuenta tanto los modelos recomendados por el fabricante del motor como la distancia de separación óptima entre las puntas de las hélices. En la plataforma real del dron, dicha distancia oscila entre los 30 mm y los 70 mm (según el tipo de hélice y el peso del dron), valores que coinciden con los descritos en [23].

Otra característica relevante en la selección del modelo de hélice es el ángulo de paso: cuanto mayor sea dicho ángulo, mayor será el empuje y el consumo, pero la potencia necesaria para accionar los rotores puede ser demasiado alta para las baterías o los ESCs [22].

Con todo ello, y teniendo en cuenta el presupuesto disponible y el plazo de entrega, se ha seleccionado el modelo de hélice APC 11\*5.5 (en pulgadas).



Ilustración 15. Hélice APC 11\*5.5 (inch)

Imagen extraída de [24]

### 4.3.4 ESCs

El siguiente componente que se seleccionó fueron los ESCs (Electronic Speed Controllers), que se encargan de controlar a los motores y suministrarles potencia, y cuya determinación resulta sencilla una vez que los motores han sido elegidos, puesto que el amperaje máximo del ESC debe coincidir con el del motor.

Se han seleccionado ESCs con clasificación nominal de 40A, capaces de soportar un pico de corriente máxima momentánea de hasta 10 segundos de 60A y compatibles con una tensión de batería entre 2S y 4S, tal y como se aprecia en la serigrafía del propio ESC en la Ilustración 16. Como se mencionará en el siguiente apartado, la batería seleccionada es de tres celdas (3S) y posee una tensión nominal de 11.1V de forma que, tal y como puede extraerse de la Ilustración 14, la corriente máxima del motor para la configuración del dron nunca excederá los 29.6A, por lo que se cuenta con un margen de seguridad aproximado del 26% en régimen nominal.



Además, estos ESCs cuentan con el firmware BLHeli\_32, que permite al usuario conectar cuatro ESCs al controlador de vuelo (en este caso, el Pixhawk, tal y como se menciona en los siguientes apartados) y configurarlos ajustando los parámetros generales del propio ESC o actualizando el firmware a través de un programa informático compatible con el dron (en esta ocasión, *QGroundControl*, tal y como se detallará más adelante).



Ilustración 16. ESC 40A

Imagen extraída de [25]

#### 4.3.5 Batería

A continuación, se seleccionó la batería. Uno de los parámetros de interés a la hora de seleccionar una batería específica es la densidad específica por unidad de precio (medida como vatios-hora por euro y gramo): para un valor fijo de la capacidad de la batería (medida en mAh), a mayor voltaje de la batería mayor será la velocidad de giro de los motores y, en consecuencia, mayor será el empuje que proporcionan; además, mayor será la energía total almacenada en la batería. Sin embargo, el peso de la batería aumentará notablemente. Por otro lado, aunque los motores de giro rápidos son más eficientes, requieren hélices más pequeñas que son, generalmente, menos eficientes.

Con todo ello, y teniendo en cuenta el presupuesto disponible y el plazo de entrega, se ha seleccionado una batería de tipo LiPo que, además de ser la recomendada por el fabricante del motor, es una de las tipologías más extendidas en el mercado y, concretamente, una batería con una configuración 3s (contiene tres celdas, cada una de 3.7V, por lo que la batería es de 11.1V) con una capacidad de 8000mAh y una tasa de descarga de 40C (esto es, una tasa de descarga máxima de 320A, equivalente a  $40 \cdot 8000 / 1000$ ).



Ilustración 17. Batería LiPo RC 3S (11.1V) 40C 8000mAh

Imagen extraída de [26]

Cabe destacar que, por razones de seguridad y de ciclo de vida, las baterías nunca deben descargarse por debajo del 20% de su capacidad total, lo que reducirá el tiempo de autonomía del dron [27].

### 4.3.6 Controlador de vuelo

El controlador de vuelo se encarga de analizar los datos de los sensores del dron y de las entradas de control de vuelo definidas por el usuario con el fin de determinar las acciones necesarias a realizar por los motores para que el dron vuele tal y como se le comande.

En este caso, se ha seleccionado como controlador de vuelo un Pixhawk, puesto que permite una mayor personalización de los controles del dron que un sistema ArduPilot, concretamente el modelo ACHICOO Pixhawk PX4 PIX 2.4.8.



Ilustración 18. Pixhawk PX4 PIX 2.4.8

Imagen extraída de [28]

### 4.3.7 Telemetría

El equipo de telemetría se encarga de transmitir y recibir datos entre una estación de tierra (como, por ejemplo, un ordenador con un software compatible con el dron) y el controlador de vuelo. De esta forma, el equipo de telemetría emula una conexión USB por radiofrecuencia y su comportamiento permite actuar de igual forma que si el controlador de vuelo se encontrase directamente conectado mediante un cable USB a la estación de tierra.

El equipo de telemetría consta de dos elementos: el módulo de tierra y el módulo de aire. El módulo de tierra se conecta a la estación de tierra por USB y el módulo de aire se conecta al controlador de vuelo a través de un conector específico.

En este caso, se ha seleccionado un equipo de telemetría bidireccional compatible con el controlador de vuelo.



Ilustración 19. Telemetría 433/915 MHz

Imagen extraída de [29]



### 4.3.8 GPS

El GPS permite al controlador de vuelo determinar la posición geográfica y, con menor precisión, la altitud del dron. Su funcionamiento es similar al de los GPS comerciales disponibles en dispositivos móviles o navegadores por satélite para coches y permite, a través de una conexión con satélites del sistema GPS, obtener las coordenadas del controlador de vuelo en un momento determinado.

Por otro lado, el GPS también habilita al dron para dos misiones de gran utilidad: la de mantener el vuelo estable en presencia de perturbaciones externas (por ejemplo, el viento), de forma que es capaz de mantener su posición tomando como base las coordenadas del GPS (lo que será denominado en secciones posteriores como modo “Position”), y la de navegar por una serie de puntos de coordenadas en un mapa programados previamente en el programa informático.

En este caso, se ha seleccionado el modelo de GPS ODAY NEO-M8N, compatible con el controlador de vuelo y que incluye, además, una brújula magnética que permite al dron determinar su rumbo, es decir, conocer hacia dónde apunta su morro.



Ilustración 20. GPS ODAY NEO-M8N

Imagen extraída de [30]

Por motivos de redundancia y para mejorar la estabilidad del dron durante el vuelo, se han colocado 2 GPS. Esto permite mitigar las posibles interferencias electromagnéticas que puedan afectar a sus brújulas, causadas por los elementos electrónicos del dron de alta potencia (principalmente, los ESCs).

### 4.3.9 Controlador remoto

El controlador de vuelo remoto para el dron que se ha seleccionado ha sido el FlySky i6X (y su correspondiente módulo receptor FlySky IA6B), que transmite al módulo receptor utilizando el protocolo iBus, lo que permite disponer de hasta 10 canales de control.



Ilustración 21. FlySky i6X y FlySky IA6B

Imagen extraída de [31]

De manera general, en el modo de vuelo estable o “Position”, que es el recomendado para volar por defecto, el controlador remoto transmite información al controlador de vuelo sobre los distintos canales de control que se definen a continuación:

- 1) Primer canal de control: si la palanca izquierda del mando es accionada en el eje vertical (arriba-abajo), se controla la velocidad de ascenso y descenso del dron. Así, si la palanca se encuentra en la posición central o neutra, el dron se mantiene estable en el eje vertical.
- 2) Segundo canal de control: es el de guiñada, donde el dron gira sobre su propio eje vertical modificando su rumbo (como ocurre al girar el volante en un coche, por ejemplo). Este se acciona moviendo la palanca izquierda de lado a lado (izquierda-derecha).
- 3) Tercer canal de control: es el de movimiento según el rumbo, donde el dron se moverá hacia delante o detrás, en la dirección en la que apunte su morro, al accionar la palanca derecha en el eje vertical (arriba-abajo).
- 4) Cuarto canal de control: es el de movimiento transversal al rumbo, donde el dron se moverá a izquierda o derecha al accionar la palanca derecha de lado a lado (izquierda-derecha).



Ilustración 22. Canales de control para modo de vuelo “Position”

Imagen extraída de [32]

La posición de estos canales y las palancas que los controlan es plenamente configurable tanto desde el lado del controlador remoto como del lado del controlador de vuelo, es decir, se puede configurar en el mando que el eje vertical de la palanca izquierda mande el canal 7 en vez del 1 y en el controlador de vuelo se puede configurar que el canal 7 es el de control del ascenso, por ejemplo.

Tradicionalmente, los controladores remotos han transmitido la información de control de los distintos canales usando una señal de control individual para cada canal desde el módulo receptor hacia el controlador de vuelo, lo que implica el uso de un cable por canal. Sin embargo, gracias a protocolos como iBus o sBus, es posible reducir el número de cables a emplear de uno por canal a tres cables en total: uno de alimentación (5V), uno de tierra y uno de señal a través del cual se transmite la información del valor de cada canal empleando un protocolo de comunicación serial.



## 5 INSTRUCCIÓN TÉCNICA DE ENSAMBLAJE

El siguiente capítulo tiene como objetivo proporcionar al usuario un procedimiento de ensamblaje completo y detallado del quadrotor descrito a lo largo del proyecto, estimándose para ello un tiempo aproximado de cuatro horas.

Se presenta, en primer lugar, la lista de materiales y componentes necesarios para llevar a cabo el ensamblaje del quadrotor:

- Carcasa S500
- Tren de aterrizaje
- 4 motores brushless típicos de uso en quadrotores (SunnySky x2814 1000KV)
- 4 ESCs de control de motores brushless, compatibles con los motores y con la batería (ESCs 40A)
- 2 pares de hélices APC 11\*5.5 (inch): 2 hélices que giren en sentido horario o CW (Clockwise) y 2 hélices que giren en sentido antihorario o CCW (Counter-clockwise)
- 1 controlador de vuelo, en este caso de la familia Pixhawk (Pixhawk PX4 PIX 2.4.8)
- 1 batería tipo LiPo de 3 celdas (11.1 V), tasa de descarga de 40C y 8000 mAh de capacidad
- 1 GPS compatible con el controlador de vuelo (GPS ODAY NEO-M8N)
- 1 equipo de telemetría bidireccional (Telemetría 433/915 MHz)
- 1 transmisor Radio Control (FlySky i6X) y 1 módulo receptor (FlySky IA6B)
- Tornillería mostrada en la Ilustración 24
- Bridas de distintos tamaños
- Fijador de tornillos (Loctite 242 o similar)
- Conectores, en caso de que los periféricos comprados no traigan un conector compatible con el Pixhawk.

También existe la posibilidad de montar un ordenador a bordo o microcontrolador extra como, por ejemplo, un microordenador del tipo Raspberry Pi, para cumplir ciertos objetivos de misión. Además, también puede llevar incorporado una cámara de tipo GoPro o FPV (First Person View) que retransmita por radiofrecuencia, con su correspondiente sistema de transmisión y recepción, así como un sistema OSD (On-Screen Display), que es una herramienta de procesamiento de imágenes que toma como entrada la imagen en directo de una cámara y le superpone una serie de datos de vuelo configurables.

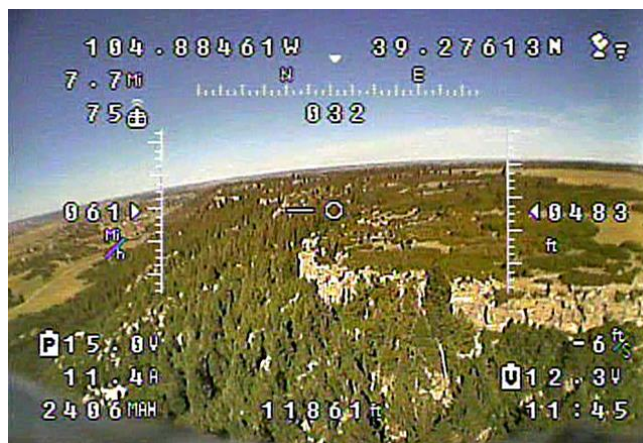


Ilustración 23. Sistema OSD

Imagen extraída de [33]

Adicionalmente, será necesario disponer de las siguientes herramientas y materiales:

- Set de llaves Allen
- Set de destornilladores, incluyendo planos y tipo Phillips
- Cortador y pelador de cables
- Soldador
- Flux
- Estaño de alta calidad
- Pinzas de soldadura (tercer brazo)
- Alicates de corte y de apriete
- Tijeras
- Set de llaves inglesas
- Cinta adhesiva de doble cara acolchada antivibraciones

Deben tomarse las debidas medidas de seguridad durante el ensamblaje, especialmente:

1. La soldadura debe llevarse a cabo en un entorno adaptado, con extractores de vapores tóxicos y por personal con experiencia o con la debida supervisión.
2. Al manejar el dron, la batería debe estar desconectada para evitar un giro accidental de las hélices.
3. Evitar el contacto entre los terminales de la batería LiPo, que podría causar un cortocircuito de la batería.

S500 with carbon fiber landing gear Manual

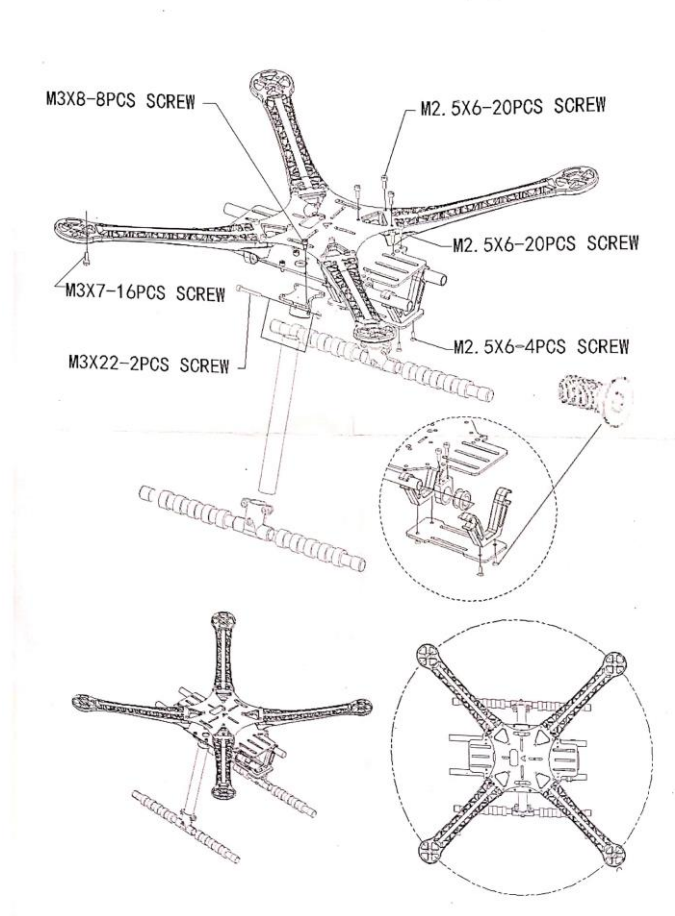


Ilustración 24. Tornillería y colocación en carcasa S500

Imagen extraída del manual de ensamblaje físico de la carcasa

## 5.1 Tren de aterrizaje

En primer lugar, se debe colocar el tren de aterrizaje en las dos patas verticales. Para ello, han de desenroscarse los tornillos del propio tren de aterrizaje y, posteriormente, han de insertarse en este las patas verticales, volviendo seguidamente a apretar los tornillos del tren de aterrizaje hasta que la pata quede fijada con seguridad debido a la compresión de la abrazadera que rodea la pata.

A continuación, para colocar la parte superior del tren de aterrizaje han de emplearse 2 tornillos M3x22 (1 para cada pata).



Ilustración 25. Montaje del tren de aterrizaje

Por último, el objetivo es unir el tren de aterrizaje a la placa de distribución de energía. Para ello, ha de atornillarse cada pata del tren de aterrizaje a dicha placa, haciendo uso de 8 tornillos M3x8 (4 para cada pata).

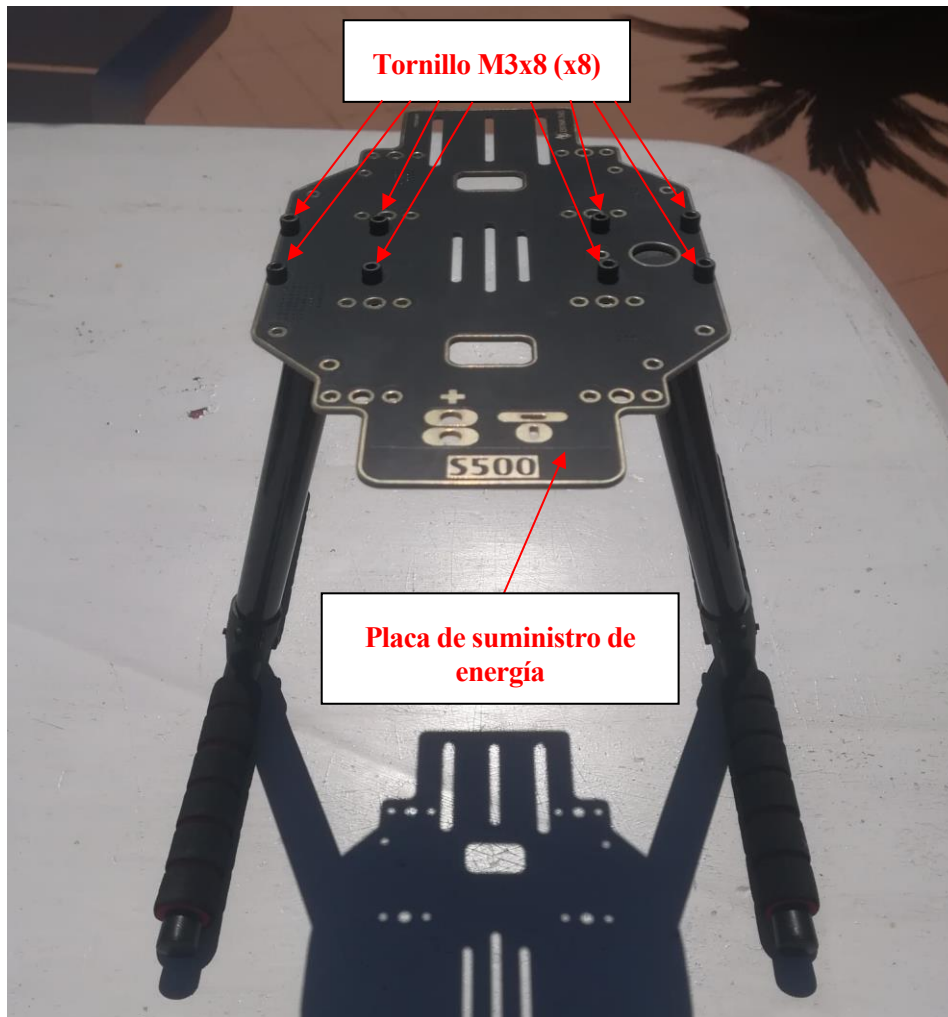


Ilustración 26. Ensamblaje de la placa de suministro de energía

Es importante que las patas del tren de aterrizaje queden alineadas entre sí y situadas en un plano paralelo a la placa de distribución de energía, lo que determina la orientación del cabezal superior de cada pata.

## 5.2 Brazos

En primer lugar, han de colocarse los cuatro brazos, donde posteriormente irán posicionados los motores, las hélices y los ESCs, en la placa superior que conforma el cuerpo del dron. Para ello, han de atornillarse dichos brazos a la placa, haciendo uso de 12 tornillos M2.5x6 (3 para cada brazo).



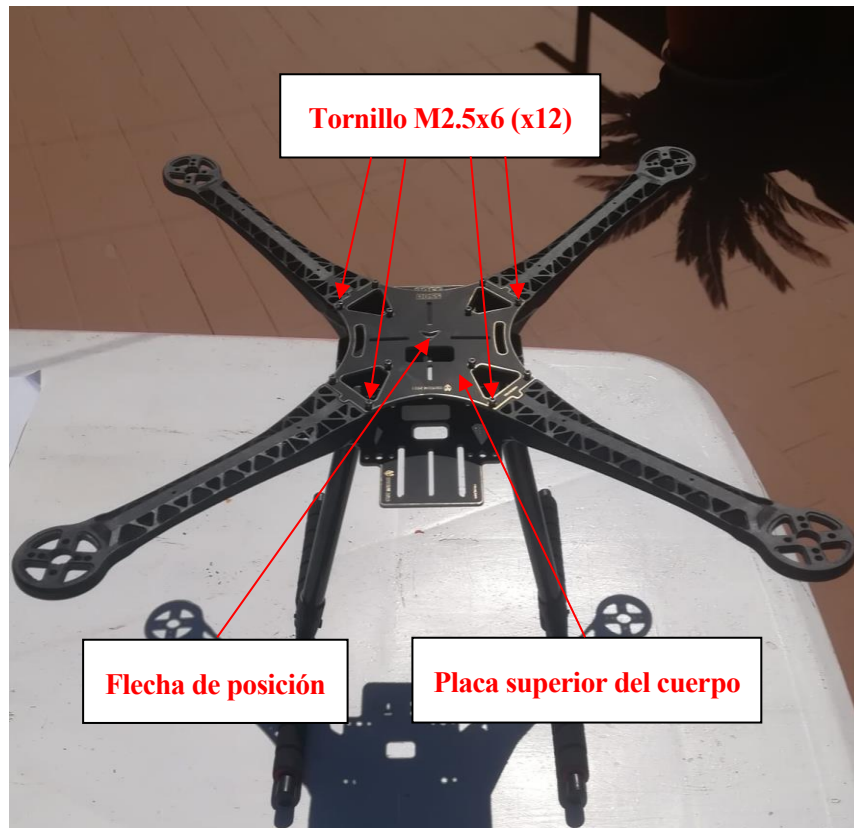


Ilustración 27. Colocación de los brazos

Posteriormente, el objetivo es unir la estructura de brazos a la placa de distribución de energía, obteniendo con ello el propio cuerpo del dron. Para ello, ha de atornillarse la estructura de brazos a la placa de distribución de energía desde la parte inferior de dicha placa, haciendo uso de 8 tornillos M2.5x6 (2 para cada brazo) y orientando la flecha de posición, señalada en la imagen anterior, hacia la parte delantera del dron correspondiente con la parte de la placa de distribución de energía que no dispone de terminales de conexión para la batería.

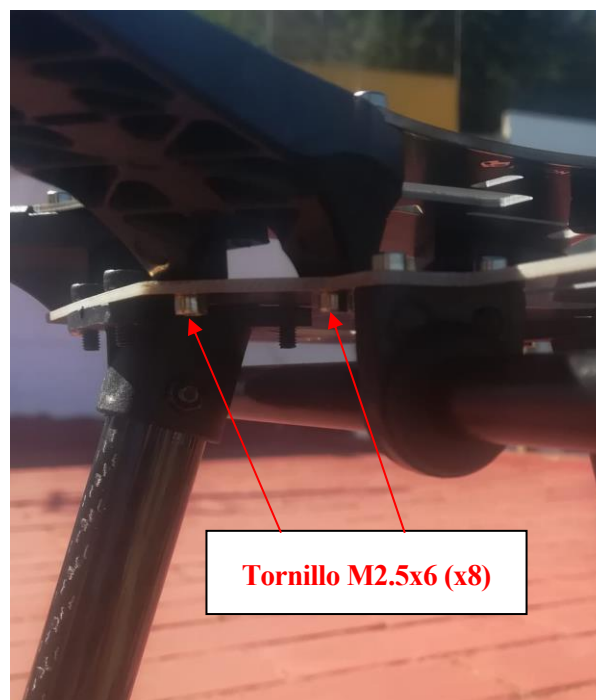


Ilustración 28. Montaje del cuerpo del dron

### 5.3 Batería

El objetivo es anclar la batería al dron. Para ello, en primer lugar, ha de insertarse cada raíl cilíndrico en la estructura de anillos y anclar dicho conjunto al cuerpo del dron, haciendo uso de 8 tornillos M2.5x6 (2 para cada conjunto de anillos).

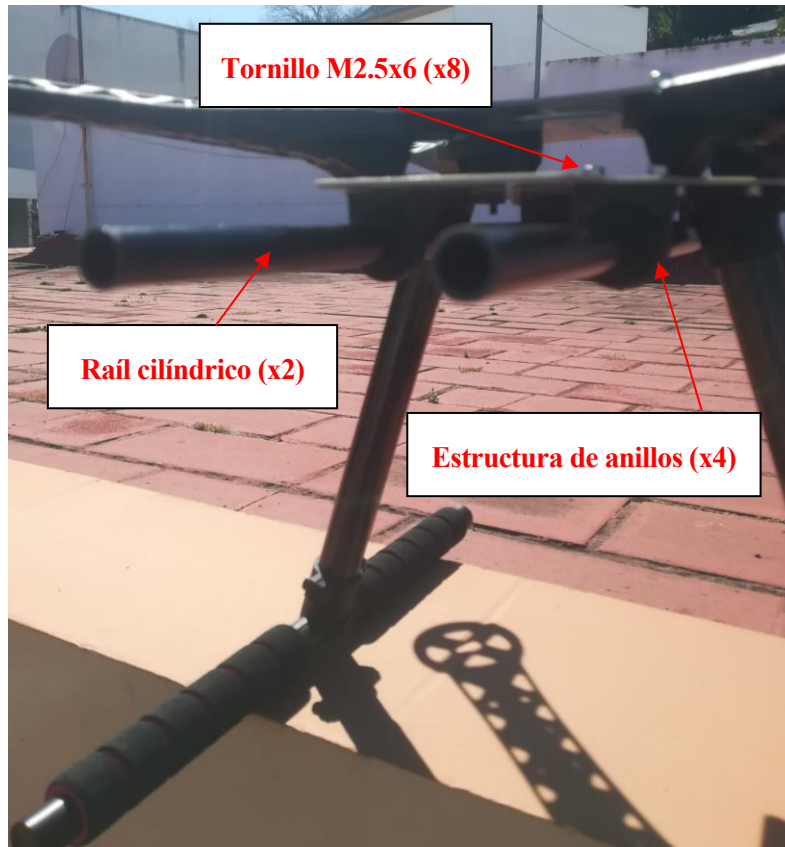


Ilustración 29. Colocación de la estructura soporte de la batería

A continuación, ha de anclarse la batería a la estructura soporte haciendo uso de bridas u otro sistema de sujeción que permita la intercambiabilidad de manera rápida y sencilla con otras baterías en caso de que, durante una misión, se desee reemplazar una batería descargada por otra cargada con el fin de aumentar la autonomía o para labores de mantenimiento.

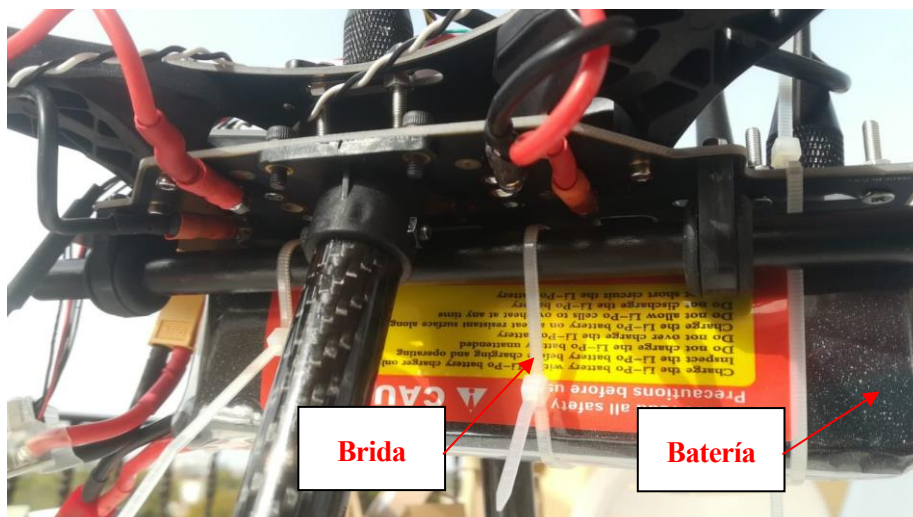


Ilustración 30. Anclaje de la batería

## 5.4 Pixhawk

Se trata de situar el Pixhawk sobre el cuerpo del dron. Para ello, ha de fijarse el Pixhawk a la cara superior del cuerpo del dron haciendo uso de cinta adhesiva de doble cara y orientándolo con la flecha apuntando hacia la parte delantera del dron. Es crucial asegurarse de que la fijación del Pixhawk al cuerpo del dron es tal que el movimiento es completamente solidario, evitando vibraciones de la estructura, y que su orientación representa adecuadamente la del dron puesto que, en caso contrario, el control que realice el Pixhawk no será el correcto.

El Pixhawk incluye un módulo de alimentación propio que se conecta en serie a la batería y le permite, además de recibir alimentación a un nivel de tensión adecuado, monitorizar el nivel de carga de la batería y el consumo de corriente en todo momento.



Ilustración 31. Colocación del Pixhawk

## 5.5 GPS

El objetivo es posicionar el GPS sobre el cuerpo del dron. Para ello, en primer lugar, ha de montarse el mástil del GPS previamente ensamblado sobre la cara superior del cuerpo del dron, preferiblemente en un lateral del Pixhawk para evitar que dicho GPS irrumpa en la trayectoria de giro de las hélices de los motores o quede al alcance de estas, así como para evitar interferencias electromagnéticas entre los motores y la brújula del GPS. En este caso, por redundancia y para mejorar la estabilidad del dron en vuelo, se han colocado 2 GPS (1 a cada lado del Pixhawk).

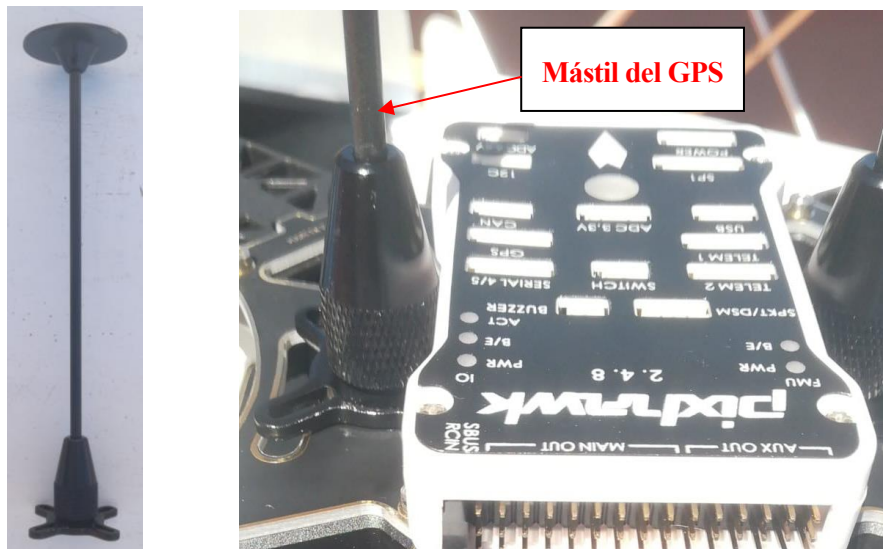


Ilustración 32. Posicionamiento del mástil del GPS

Por seguridad y para evitar el desprendimiento del GPS durante el vuelo del dron, es recomendable anclar el mástil del GPS a la propia carcasa del dron haciendo uso de la tornillería que acompaña al GPS, mostrada en la siguiente ilustración, evitando que dichos tornillos entren en contacto con la batería.



Ilustración 33. Elementos que componen el mástil del GPS y tornillería

A continuación, ha de colocarse el cuerpo del GPS sobre el soporte superior del mástil haciendo uso de cinta adhesiva de doble cara y orientándolo con la flecha apuntando hacia la parte delantera del dron, en concordancia con el Pixhawk. Al igual que ocurría con el Pixhawk, resulta de vital importancia que la orientación del GPS sea representativa de la orientación real del dron.



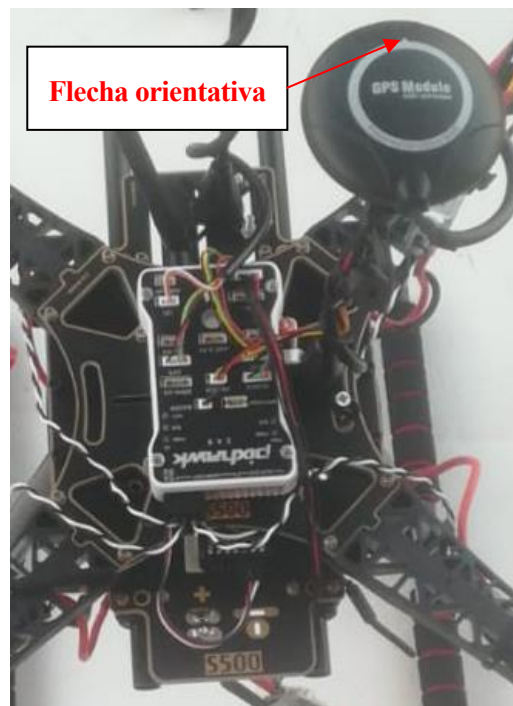


Ilustración 34. Colocación del cuerpo del GPS

Es recomendable sujetar el botón de armado del dron y el buzzer sobre el mástil del GPS, para evitar que puedan interferir con otros elementos durante el vuelo del dron.

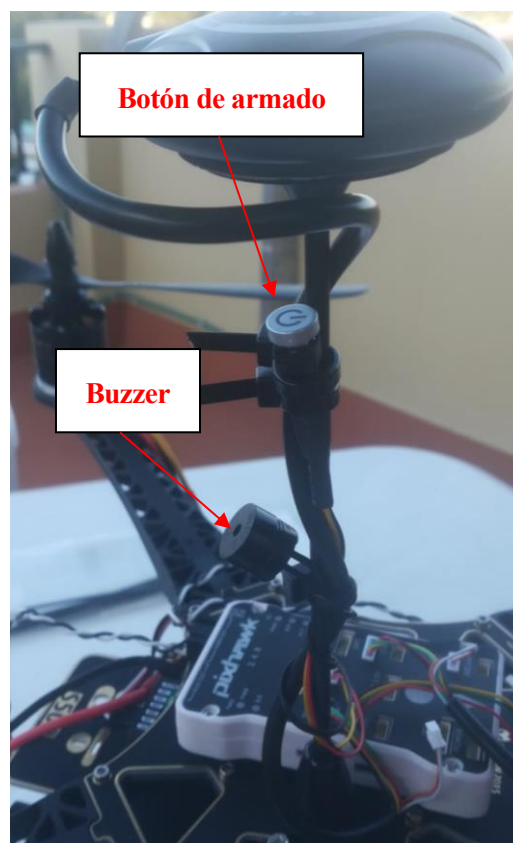


Ilustración 35. Anclaje del botón de armado y del buzzer

## 5.6 Telemetría

El objetivo es situar el módulo de vuelo de la telemetría sobre el cuerpo del dron. Para ello, ha de fijarse dicho módulo a la cara superior del cuerpo del dron haciendo uso de cinta adhesiva de doble cara, preferiblemente cerca del Pixhawk para facilitar el cableado posterior.

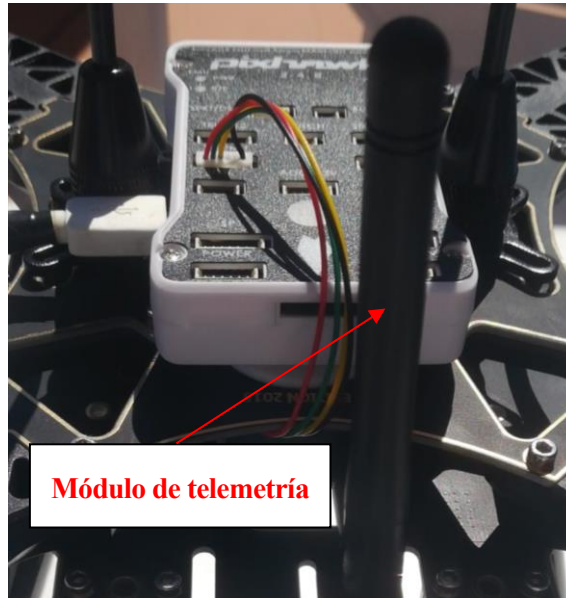


Ilustración 36. Posicionamiento del módulo de vuelo de la telemetría

## 5.7 Receptor del mando

Se debe situar el módulo de recepción del mando de vuelo sobre el propio cuerpo del dron. Para ello, al igual que ocurría con la telemetría, ha de fijarse dicho módulo a la cara superior del cuerpo del dron haciendo uso de cinta adhesiva de doble cara, preferiblemente cerca del Pixhawk para facilitar el cableado posterior.

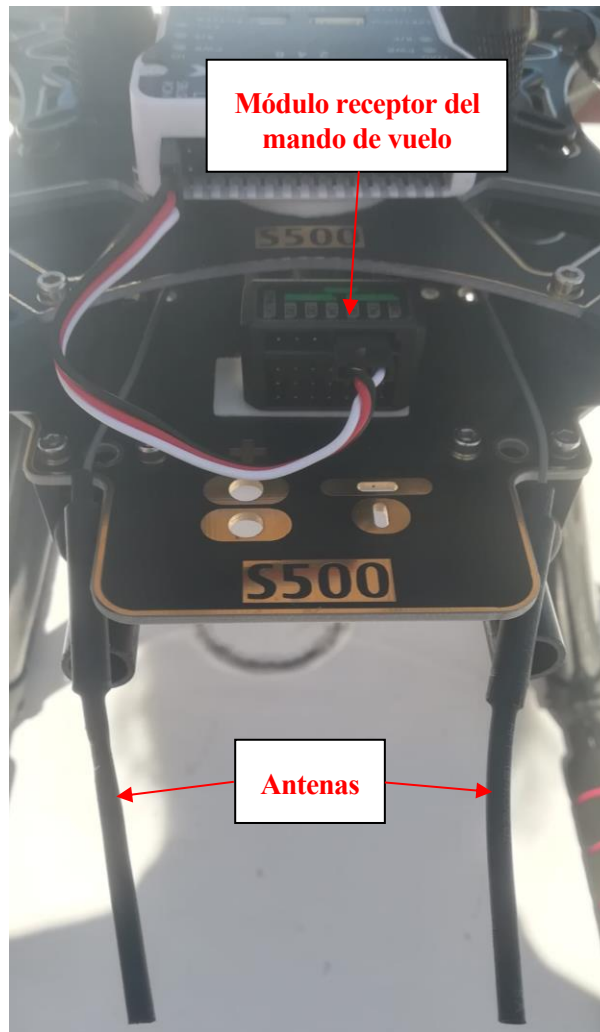


Ilustración 37. Colocación del módulo receptor del mando de vuelo

Las dos antenas del módulo de recepción, señaladas en la imagen anterior, han de situarse hacia el exterior del cuerpo del dron para su posterior sujeción con bridas a los brazos de este, evitando con ello cualquier interferencia con otros elementos del ensamblaje.

## 5.8 Motores

El objetivo es montar los motores en los brazos del dron. Para ello, ha de atornillarse el motor al extremo del brazo desde la parte inferior del brazo, haciendo uso de 16 tornillos M3x7 (4 para cada motor).



Ilustración 38. Montaje de los motores

## 5.9 ESCs

Se trata de posicionar los ESCs en los brazos del dron. Para ello, ha de situarse cada ESC en cada brazo del dron sujetándolo con bridas, preferiblemente por la cara inferior del brazo para facilitar el cableado posterior en la placa de distribución de energía.

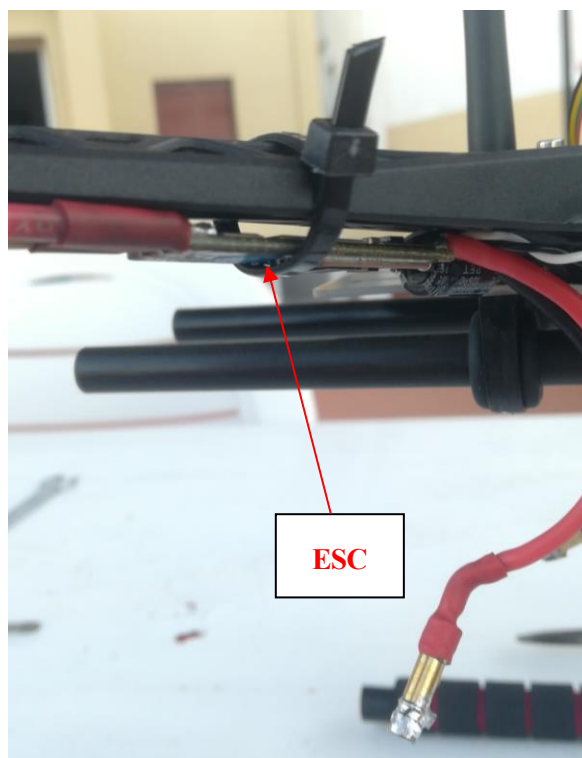


Ilustración 39. Colocación de los ESCs



## 5.10 Hélices

El objetivo es ensamblar las hélices en los motores. Para ello, en primer lugar, ha de introducirse el separador metálico sobre el que se apoya la hélice y, a continuación, ha de insertarse cada hélice por la parte superior del eje de cada motor y apretar la tuerca y el casquillo superior que la ancla al propio motor. Según el tipo de hélice, deberá colocarse una junta en el centro de la hélice para adaptar el diámetro interno de esta al diámetro del vástago del motor, de forma que no haya holgura.

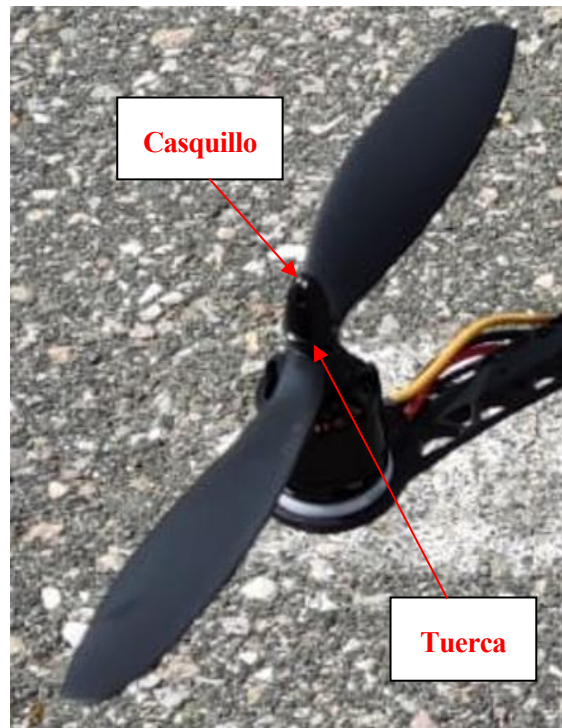


Ilustración 40. Ensamblaje de las hélices

Un aspecto de vital importancia es asegurarse de que las hélices se montarán en los motores en la orientación correcta, puesto que de ello dependerá el equilibrio del dron durante el vuelo. Así, el posicionamiento correcto de las hélices para el quadrotor es el mostrado en la siguiente ilustración:

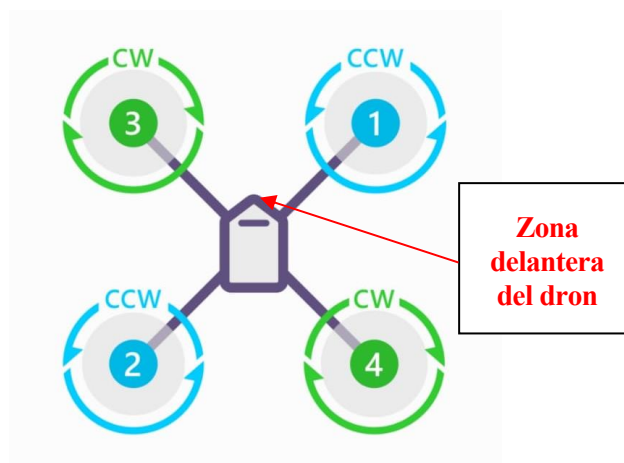


Ilustración 41. Posicionamiento de las hélices

Imagen extraída de [34]

Se detalla en [34] una forma sencilla de determinar si la hélice es CW o CCW: el borde de ataque de la hélice se puede identificar como el lado más grueso y será el que se mueva en el sentido de rotación del motor, mientras que el borde de salida suele ser más delgado y presenta una mayor ondulación en la vista en planta.

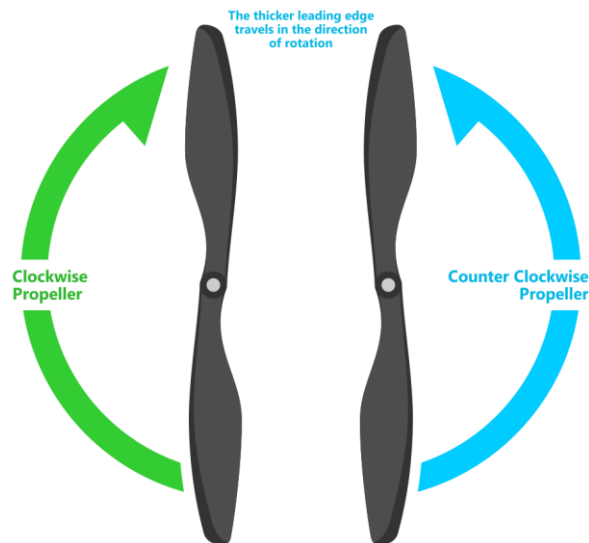


Ilustración 42. Determinación del borde de ataque de la hélice

Imagen extraída de [34]

## 5.11 Fijación de la tornillería

Una vez ensamblados todos los componentes, se trata de fijar los tornillos en su posición para evitar que se desprendan durante el vuelo debido a las vibraciones. Para ello, se aplica sobre cada tornillo un poco de fijador de tornillos, del tipo Loctite 242 o similar.

## 5.12 Cableado

Por último, es necesario realizar interconexiones físicas entre todos los componentes. Se presenta a continuación el diagrama de cableado del dron:

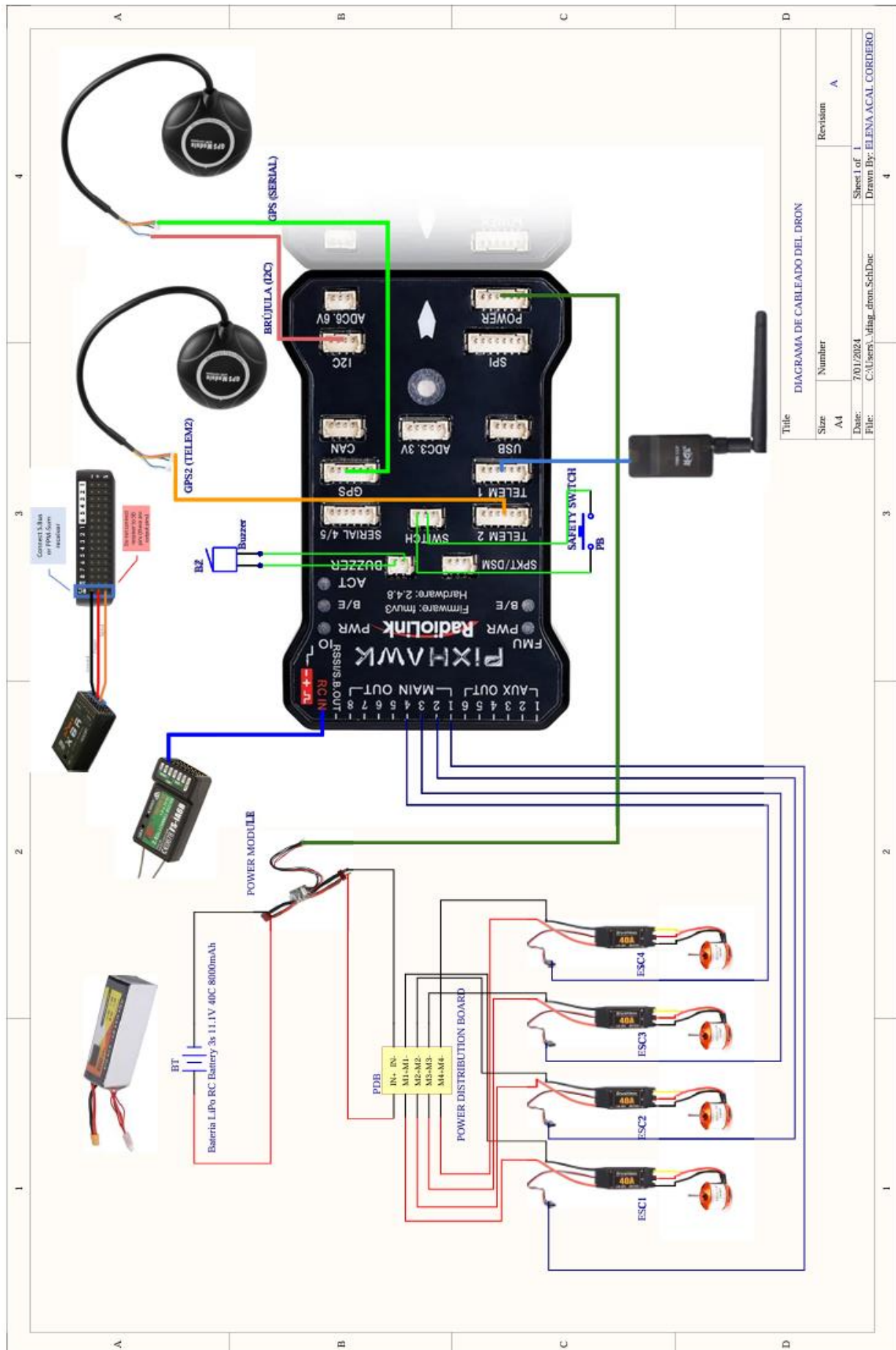


Ilustración 43. Diagrama de cableado




# 6 CONFIGURACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL DRON PREVIA AL VUELO

Se muestra en el siguiente capítulo una guía de configuración y calibración del dron previa al vuelo. Para ello, se empleará el programa informático *QGroundControl*, que puede instalarse en cualquier dispositivo móvil, tablet u ordenador. Se ha seleccionado este software debido a su compatibilidad con la plataforma Pixhawk, pero existen otras suites de configuración como, por ejemplo, *Betaflight*, más orientada a drones de pequeño tamaño y de carreras.

## 6.1 Firmware

Antes de actualizar el firmware es necesario comprobar que todas las conexiones USB al dron se encuentran desconectadas, tanto las directas como las realizadas a través de los módulos de telemetría.

Para llevar a cabo la instalación del firmware actualizado, deberá accederse al apartado *Firmware* dentro de la pestaña *Vehicle Setup*, que se encuentra en la ventana emergente que aparece tras seleccionar el icono  situado en la esquina superior izquierda de la interfaz.

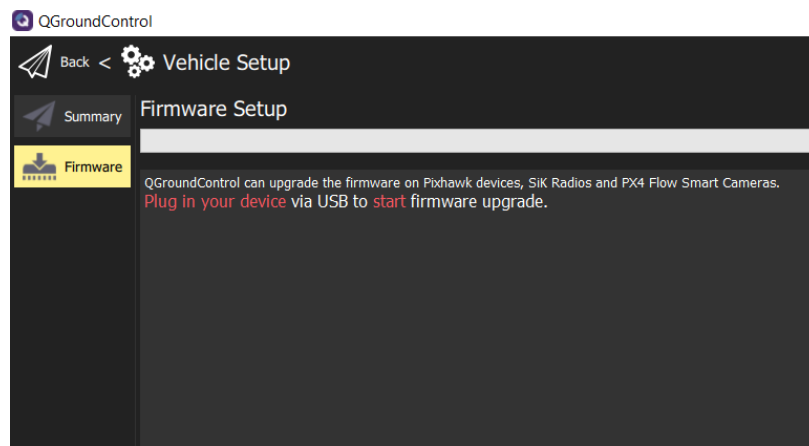
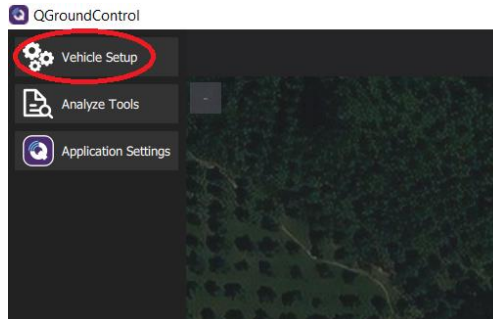


Ilustración 44. Firmware

En este momento, ha de conectarse el Pixhawk directamente al dispositivo por USB, seleccionar la opción *PX4 Pro Stable Release v1.12.3* (o la versión más actual en el momento) que aparece en la ventana emergente *Firmware Setup* situada a la derecha de la interfaz y hacer clic en *Ok* para instalar la última versión del firmware. Una vez finalizado el proceso, el dron se reiniciará y se volverá a conectar al dispositivo.



Ilustración 45. Instalación del firmware

Este procedimiento solo será necesario realizarlo antes del primer vuelo del quadrotor, siempre que no se modifique el controlador de vuelo, no existan actualizaciones del firmware y el dron no sufra fuertes impactos.

## 6.2 Fuselaje

Resulta indispensable definir la configuración del fuselaje que represente al dron de la manera más fiel de entre las opciones predeterminadas que se presentan en el programa, puesto que una buena selección de esta permitirá al quadrotor volar correctamente siguiendo la configuración estándar predefinida en el software para la tipología de vehículo en cuestión.

Para ello, ha de conectarse el dron al dispositivo, bien por USB directamente o bien mediante el módulo de tierra de la telemetría, y acceder al apartado *Airframe* dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente. En el caso particular de este dron, deberá seleccionarse el fuselaje *Quadrotor x*, dentro del desplegable ha de elegirse el modelo *S500 Generic* y hacer clic en *Apply and Restart* para guardar la configuración. Una vez finalizado el proceso, el dron se reiniciará y se volverá a conectar al dispositivo.

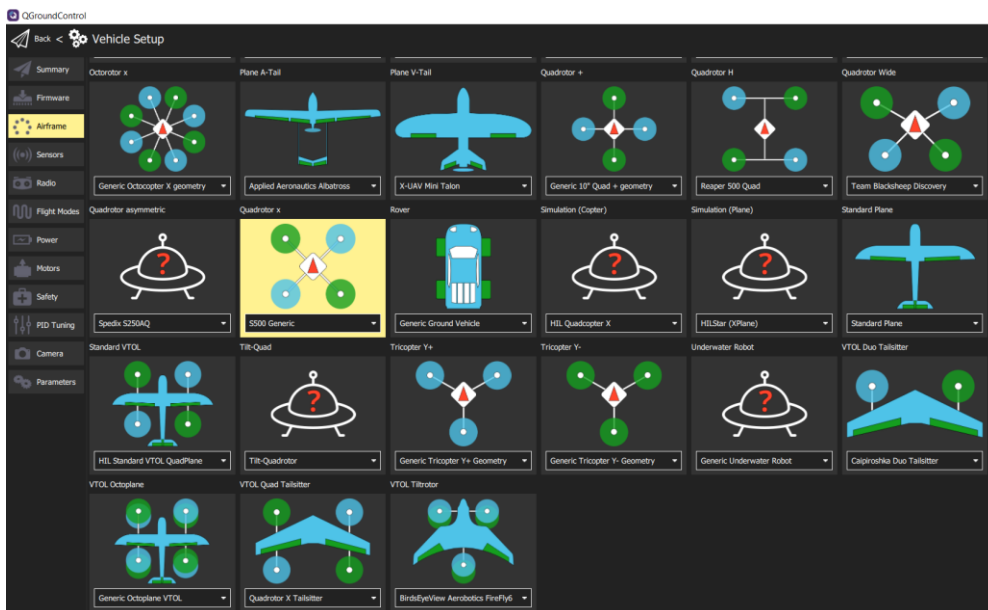


Ilustración 46. Definición del fuselaje

Este procedimiento solo será necesario realizarlo antes del primer vuelo del quadrotor, siempre que no se modifique la configuración del fuselaje de este.

### 6.3 Sensores de orientación

La configuración de los sensores de orientación tiene como principal objetivo establecer la orientación del Pixhawk, así como de cualquier brújula externa colocada en la estructura del dron.

Para llevar a cabo este proceso ha de conectarse el dron al dispositivo, bien por USB directamente o bien mediante el módulo de tierra de la telemetría, acceder al apartado *Sensors* dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente y hacer clic en *Orientations*, que muestra la ventana emergente *Set Orientations* en la derecha de la interfaz donde deberá indicarse tanto la orientación del Pixhawk como la de la brújula externa embarcada en uno de los GPS.

En el caso particular de este dron, tanto el Pixhawk como el GPS se encuentran posicionados en la dirección y sentido del vuelo, es decir, con la flecha del componente apuntando hacia la parte delantera del vehículo. Es por ello por lo que en los dos desplegables que aparecen en la ventana *Set Orientations* ha de seleccionarse la opción *ROTATION\_NONE*, que se corresponde con un ángulo de guiñada entre la zona delantera dron y del elemento en cuestión de  $0^\circ$ . Para registrar esta configuración, deberá hacerse clic en *Ok*.

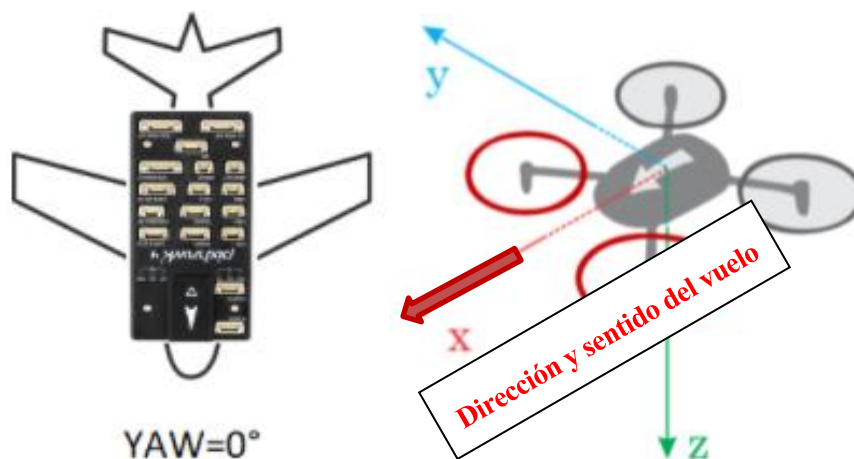


Ilustración 47. Determinación del ángulo de guiñada

Imagen extraída de [35]

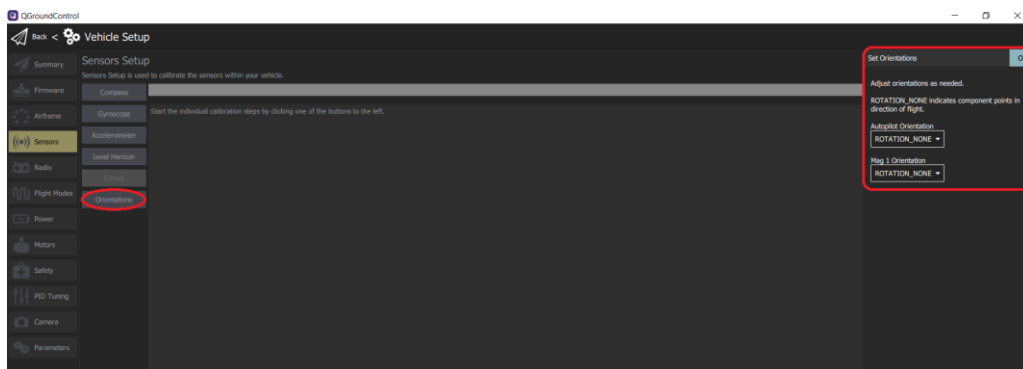


Ilustración 48. Configuración de los sensores de orientación

Este procedimiento solo será necesario realizarlo antes del primer vuelo del quadrotor, siempre que se mantengan los mismos componentes dentro del ensamblaje del dron y en la misma orientación, y el dron no sufra fuertes impactos.

## 6.4 Brújulas

Para llevar a cabo el proceso de calibración de las brújulas es imprescindible seleccionar un lugar alejado de cualquier campo magnético y de objetos metálicos. De igual forma, resulta importante calibrar todas las brújulas del dron, tanto internas como externas, para conseguir un buen control de la posición y de la orientación del vehículo durante el vuelo. En el caso particular de este dron, se dispone de la brújula interna del propio Pixhawk y de una brújula externa incorporada en uno de los GPS.

Para realizar el procedimiento de calibración ha de conectarse el dron al dispositivo, bien por USB directamente o bien mediante el módulo de tierra de la telemetría, acceder al apartado *Sensors* dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente y hacer clic en *Compass*, que muestra la ventana emergente *Calibrate Compass* en la derecha de la interfaz donde ha de comprobarse que la orientación del Pixhawk dentro del desplegable *Autopilot Orientation* se corresponde con la establecida previamente. Al hacer clic en *Ok*, comenzará el proceso de calibración de las brújulas.



Ilustración 49. Calibración de las brújulas

Dicho proceso consiste en colocar el dron en las distintas posiciones que se requieren y que se muestran de color rojo. Manteniendo el vehículo estático, el software detectará una de las posiciones y la ventana asociada a dicha posición se pondrá de color amarillo mostrando, además, una flecha verde que indica el eje alrededor del que ha de girarse el dron. Una vez finalizada la calibración de una posición, su ventana se mostrará de color verde y la barra de progreso global situada en la zona superior de la interfaz se irá llenando. Ha de repetirse esta secuencia con cada una de las posiciones requeridas hasta completar el proceso.



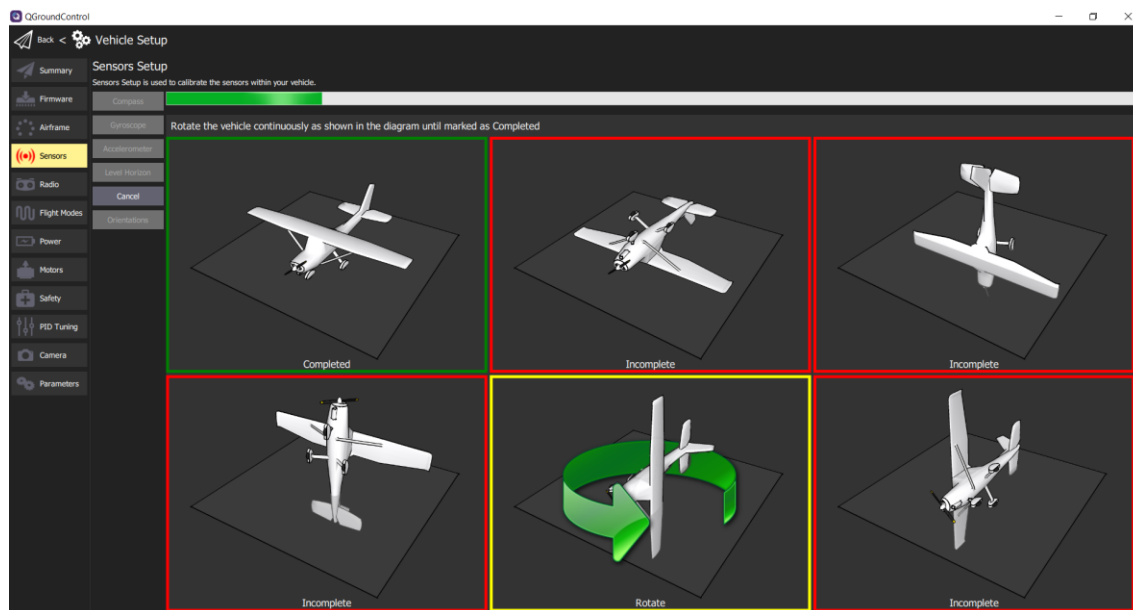


Ilustración 50. Procedimiento de calibración de las brújulas

Se recomienda realizar siempre este procedimiento antes de cada vuelo del quadrotor, especialmente cuando este se haya visto sometido a un fuerte campo magnético o haya sufrido fuertes impactos, se cambien los componentes en cuestión o modifiquen su orientación dentro del ensamblaje, o hayan transcurrido largos periodos de tiempo entre vuelos. En caso de que no se realice la calibración de las brújulas, es posible que la información sobre el rumbo del dron durante el vuelo sea errónea.

## 6.5 Giróscopo

Para realizar el procedimiento de calibración del giróscopo del controlador de vuelo ha de conectarse el dron al dispositivo, bien por USB directamente o bien mediante el módulo de tierra de la telemetría, acceder al apartado *Sensors* dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente y hacer clic en *Gyroscope*, que muestra la ventana emergente *Calibrate Gyro* en la derecha de la interfaz. Al hacer clic en *Ok*, comenzará el proceso de calibración del giróscopo.

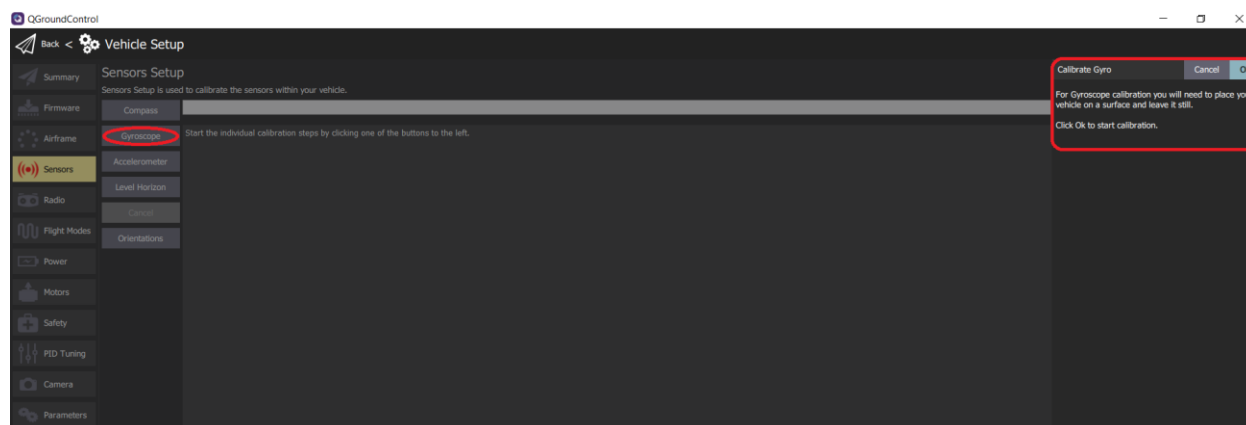


Ilustración 51. Calibración del giróscopo

El proceso consiste en depositar el dron sobre una superficie plana y mantenerlo inmóvil hasta que la ventana de color rojo se vuelva de color verde y la barra de progreso situada en la zona superior de la interfaz se llene al completo.

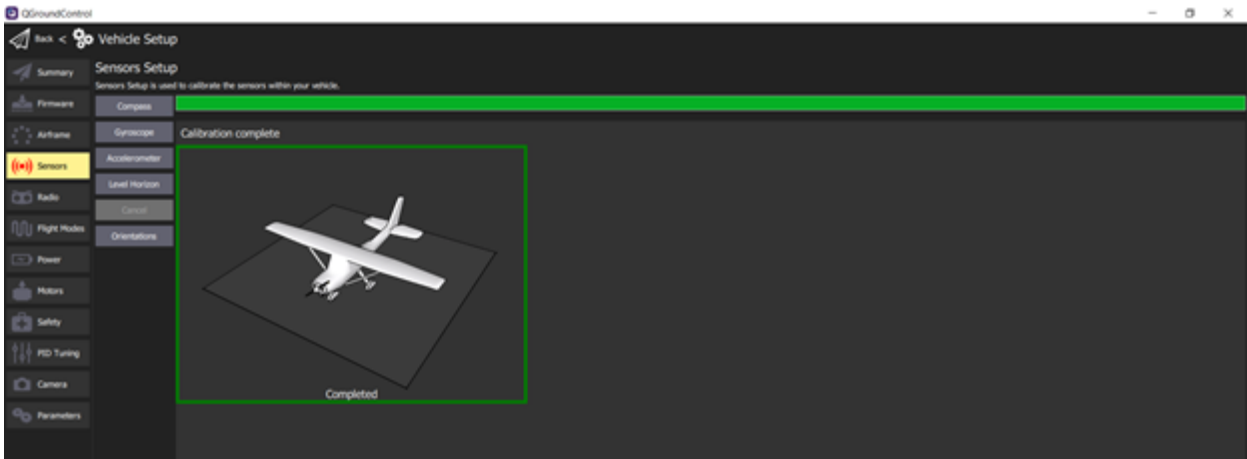


Ilustración 52. Proceso de calibración del giróscopo

Se recomienda realizar siempre este procedimiento antes de cada vuelo del quadrotor, especialmente cuando este haya sufrido fuertes impactos, se modifique el controlador de vuelo o hayan transcurrido largos periodos de tiempo entre vuelos. En caso de que no se realice la calibración del giróscopo, el dron podría presentar comportamientos inestables durante el vuelo.

## 6.6 Acelerómetro

Para realizar el procedimiento de calibración del acelerómetro del controlador de vuelo ha de conectarse el dron al dispositivo, bien por USB directamente o bien mediante el módulo de tierra de la telemetría, acceder al apartado *Sensors* dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente y hacer clic en *Accelerometer*, que muestra la ventana emergente *Calibrate Accelerometer* en la derecha de la interfaz donde ha de comprobarse que la orientación Pixhawk dentro del desplegable *Autopilot Orientation* se corresponde con la establecida previamente. Al hacer clic en *Ok*, comenzará el proceso de calibración del acelerómetro.

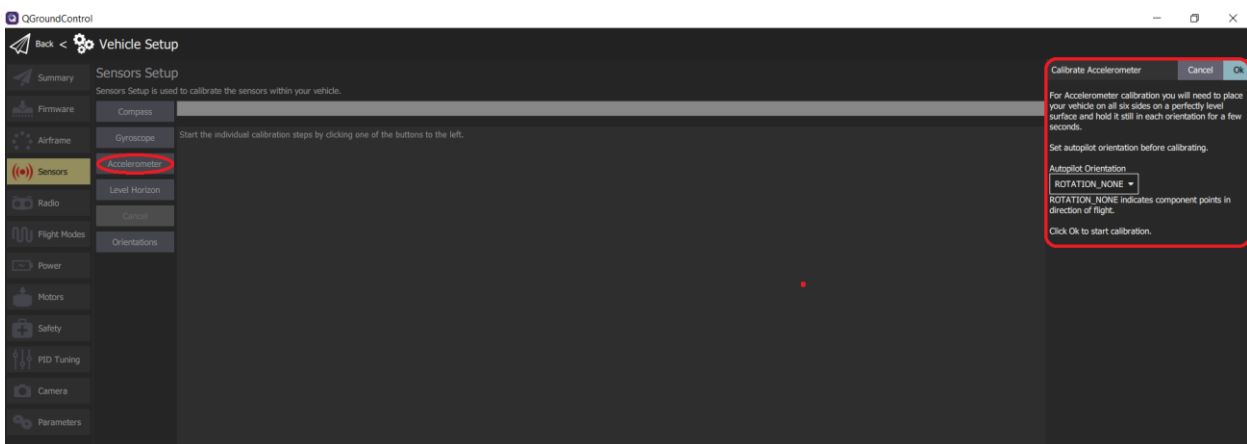


Ilustración 53. Calibración del acelerómetro

Este proceso se basa en colocar el dron en las distintas posiciones que se requieren y que se muestran de color rojo. Manteniendo el vehículo inmóvil sobre una superficie perfectamente nivelada, el software detectará una de las posiciones y la ventana asociada a dicha posición se pondrá de color verde, y la barra de progreso global situada en la zona superior de la interfaz se irá llenando. Ha de repetirse esta secuencia con cada una de las posiciones requeridas hasta completar el proceso.

Es crucial realizar este paso sobre una superficie perfectamente horizontal, ya que el controlador de vuelo empleará esta calibración para determinar la dirección de la gravedad, imprescindible para poder realizar un control adecuado. En el caso de que se emplease una superficie con inclinación, el quadrotor presentaría una tendencia a tratar de mantenerse en una posición estacionaria en vuelo perpendicular a la superficie de calibración, no permitiendo el vuelo y presentando permanentemente una deriva.

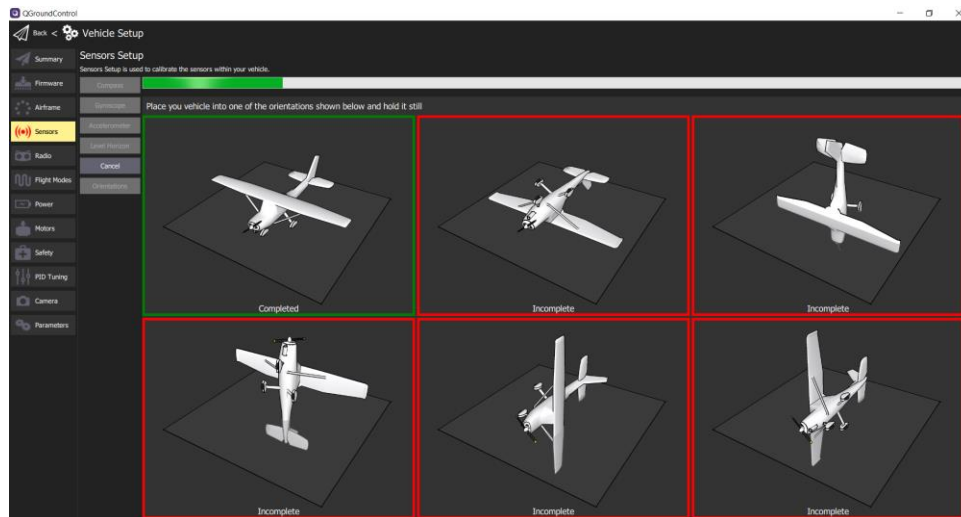


Ilustración 54. Procedimiento de calibración del acelerómetro

Se recomienda realizar siempre este procedimiento antes de cada vuelo del quadrotor, especialmente cuando este haya sufrido fuertes impactos, se modifique el controlador de vuelo o su posición dentro del ensamblaje, o hayan transcurrido largos periodos de tiempo entre vuelos. En caso de que no se realice la calibración del acelerómetro, el dron podría presentar una deriva durante el vuelo, esto es, desplazarse lateralmente en lugar de permanecer en equilibrio en una posición fija.

## 6.7 Horizonte de nivel

El objetivo de calibrar el horizonte de nivel es poder compensar desalineaciones en el controlador de vuelo, nivelando con ello el horizonte de vuelo y mejorando el rendimiento del dron durante el vuelo.

Para realizar el proceso ha de conectarse el dron al dispositivo, bien por USB directamente o bien mediante el módulo de tierra de la telemetría, acceder al apartado *Sensors* dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente y hacer clic en *Level Horizon*, que muestra la ventana emergente *Level Horizon* en la derecha de la interfaz. Ha de posicionarse el dron sobre una superficie nivelada y, al hacer clic en *Ok*, comenzará el proceso de calibración del horizonte de nivel.

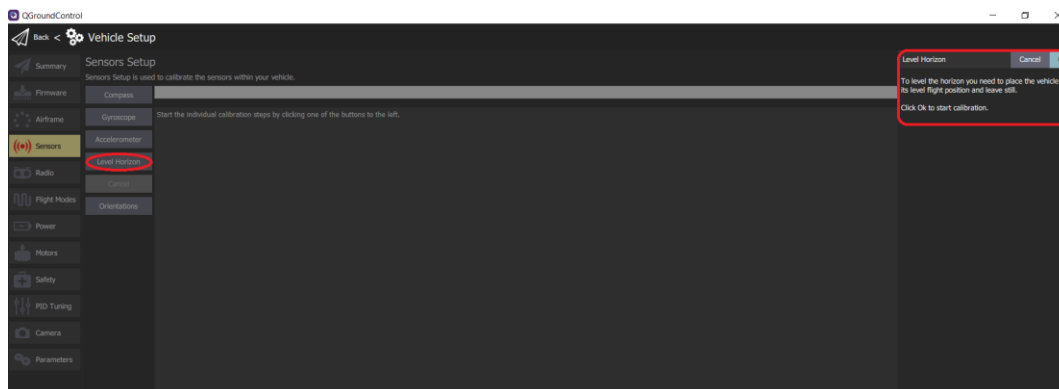


Ilustración 55. Proceso de calibración del horizonte de nivel

Una vez finalizada la calibración, ha de observarse en la vista de vuelo que el rumbo de la brújula muestra un valor cercano a 0 cuando el dron apunta hacia el norte y que el horizonte se encuentra nivelado, de forma que toda la zona azul se encuentra en la parte superior y toda la zona verde en la inferior.

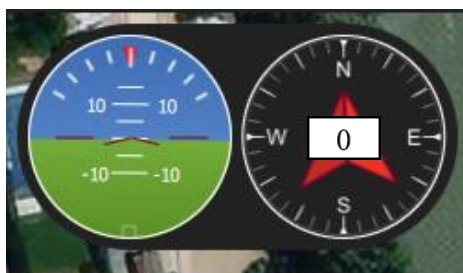


Ilustración 56. Vista de vuelo – Brújula y horizonte de vuelo

Se recomienda realizar siempre este procedimiento antes de cada vuelo del quadrotor, para eliminar posibles desviaciones en la calibración durante el transporte del propio vehículo.

## 6.8 Sistema de radiocontrol

Es necesario configurar el sistema de radiocontrol para poder pilotar el dron de manera remota durante el vuelo empleando, en este caso, un mando transmisor que cuenta con una serie de palancas e interruptores de control de actitud.

En primer lugar, resulta imprescindible enlazar el mando transmisor del sistema de radiocontrol con el módulo receptor situado en la propia estructura del dron. Por lo general, en la configuración por defecto, ambos se encuentran enlazados. No obstante, puede ser necesario realizar este proceso en distintos escenarios, como podría ser una desconfiguración del mando debido a la descarga de su batería o bien la necesidad de usar un receptor distinto al suministrado con el propio mando.

Dicho procedimiento de enlazado consiste en conectar el cable de enlazado, tal y como se muestra en la siguiente imagen, y, a continuación, alimentar el módulo receptor a 5 VDC usando los pines disponibles para ello y el cable proveniente del Pixhawk.



Ilustración 57. Módulo receptor con cable de enlazado

Imagen extraída de [31]

Por último, manteniendo pulsado el botón *BIND KEY*, encender el mando a través del interruptor *POWER*.

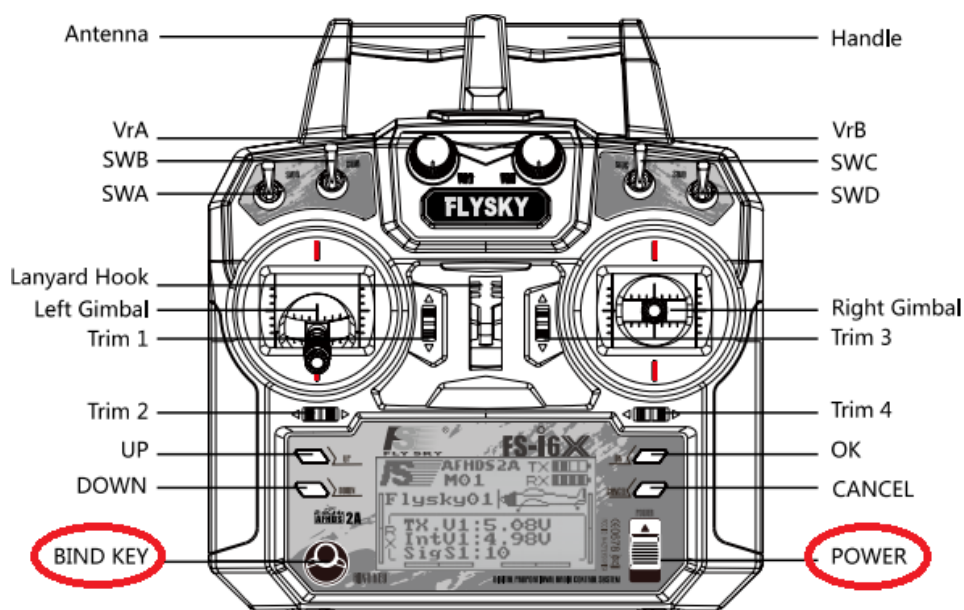


Ilustración 58. Mando transmisor

Imagen extraída de [31]

Para calibrar el sistema de radiocontrol, es recomendable desconectar todos los motores con sus respectivas hélices para mayor seguridad, aunque el sistema está diseñado para que el dron no pueda armarse durante la calibración. Para llevar a cabo el proceso de calibración ha de conectarse el dron al dispositivo, bien por USB directamente o bien mediante el módulo de tierra de la telemetría, y acceder al apartado *Radio* dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente, que muestra en la zona derecha de la interfaz la ventana emergente *Radio* donde, al hacer clic en *Ok*, dará comienzo la calibración.

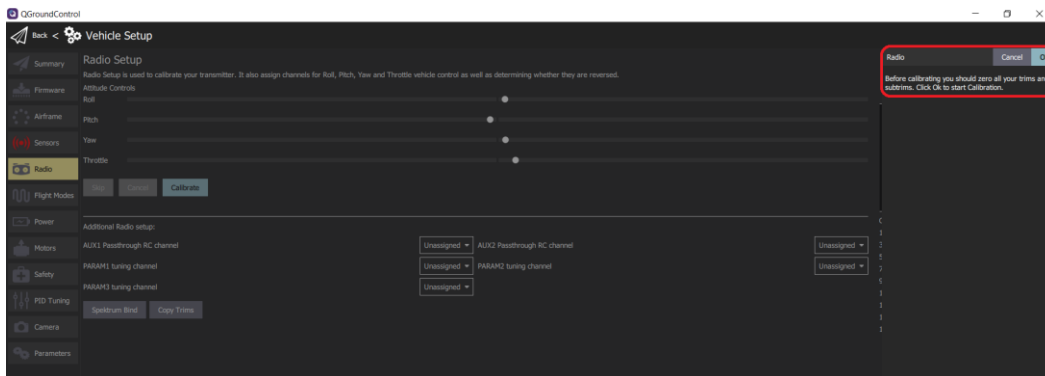


Ilustración 59. Calibración del sistema de radiocontrol

A continuación, resulta necesario configurar el modo del mando transmisor en la ventana de la derecha para que se ajuste al modelo real y pueda mostrar las posiciones correctas de las palancas del mando.

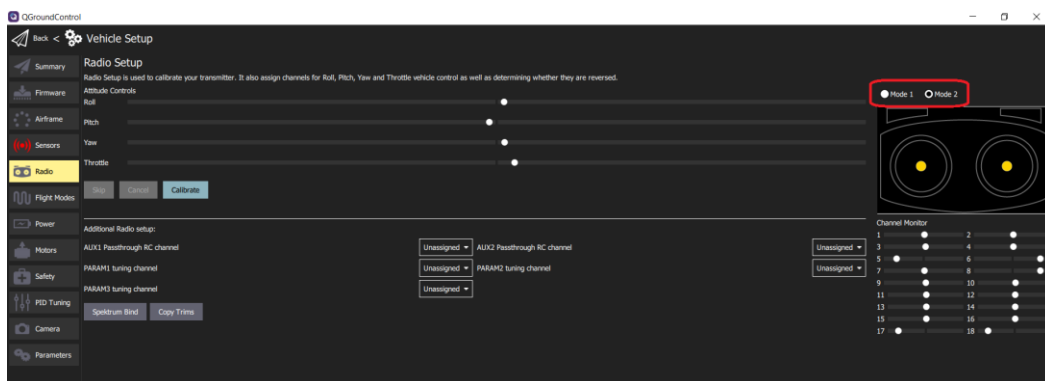


Ilustración 60. Configuración del modo del mando transmisor

El proceso de calibración del sistema de radiocontrol consiste en ir moviendo las palancas de control del mando a las posiciones que se indican hasta que alcancen dichas posiciones, pulsando *Next* cada vez que se logre una posición en una palanca. Además, es recomendable realizar un barrido de todas las palancas del mando a lo largo de todo el rango de movimiento para comprobar el correcto funcionamiento de cada una de ellas. Dicho movimiento puede observarse a tiempo real en el apartado *Channel Monitor* situado en la ventana de la derecha. Ha de pulsarse en *Next* al final del proceso de calibración para guardar la configuración.

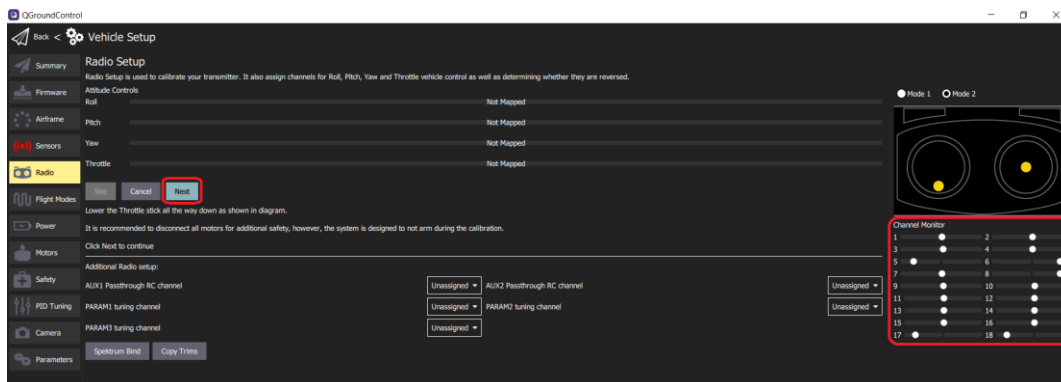


Ilustración 61. Proceso de calibración del sistema de radiocontrol

Otro proceso importante consiste en asignar los diferentes modos de vuelo del dron a las palancas del mando transmisor. Para ello, manteniendo el dron conectado al dispositivo, ha de accederse al apartado *Flight Modes* dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente. Si el cuadro de diálogo se abre en modo multicanal, hacer clic sobre *Use Single Channel Mode Selection* para cambiar el modo a canal único, pues es el más útil para asignar distintos modos de vuelo que cambien las posiciones codificadas en un único canal.

El proceso de configuración de los modos de vuelo consiste en seleccionar el canal específico en el desplegable *Mode Channel* que se encuentra en la sección *Flight Mode Settings*, lo que resaltará en la zona *Channel Monitor* situada a la derecha la barra correspondiente y habilitará la palanca previamente asignada en el mando transmisor. En ese momento, es posible asignar al canal en cuestión los modos de vuelo que se deseen a través de los desplegables *Flight Mode X*.

Esto implica en la práctica que, accionando en el mando transmisor la palanca asignada previamente a cada canal, el piloto puede activar distintos modos de vuelo que modifican el comportamiento del dron en función de la posición de dicha palanca. Por ejemplo, si se coloca una palanca en la posición que activa el modo “Position”, el dron tratará de mantenerse en una ubicación de manera estable utilizando los datos del GPS a no ser que se comande lo contrario desde el mando, es decir, mientras no se le ordene bajar, subir, rotar o desplazarse horizontalmente. Otro ejemplo sería colocar una palanca en la posición que activa el modo “Land”, donde el dron descenderá lentamente, teniendo en cuenta sólo los comandos de desplazamiento horizontal, hasta tocar suavemente el suelo para, finalmente, apagar los motores.

Cabe destacar que, para poder acceder a cada modo de vuelo, el dron debe cumplir con todas las condiciones necesarias para que dicho modo pueda activarse. Por ejemplo, para que el dron pueda activar el modo “Take off”, necesita haberse armado previamente sobre una superficie plana.

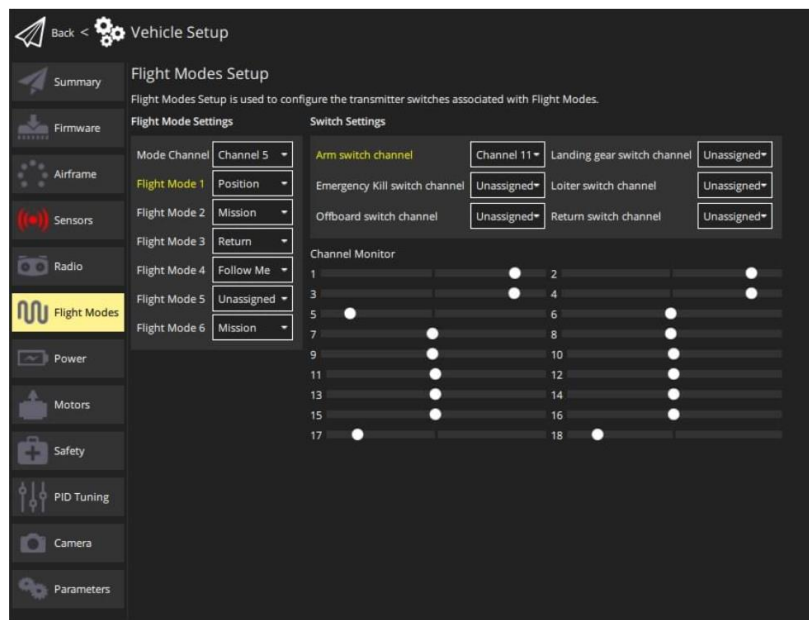


Ilustración 62. Proceso de configuración de los modos de vuelo

## 6.9 Batería

Un aspecto crucial en la configuración del dron previa al vuelo es la definición de los parámetros de la batería, puesto que de ella dependen, principalmente, tanto la autonomía del vehículo como su correcto funcionamiento durante el vuelo.

Para realizar la configuración de la batería ha de conectarse el dron al dispositivo, bien por USB directamente o bien mediante el módulo de tierra de la telemetría, y acceder al apartado *Power* dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente, que habilitará una serie de casillas en la sección *Battery* donde es posible escribir los parámetros básicos de caracterización de la batería aunque, de forma general, el software calcula de manera automática estos parámetros al estar la batería conectada.

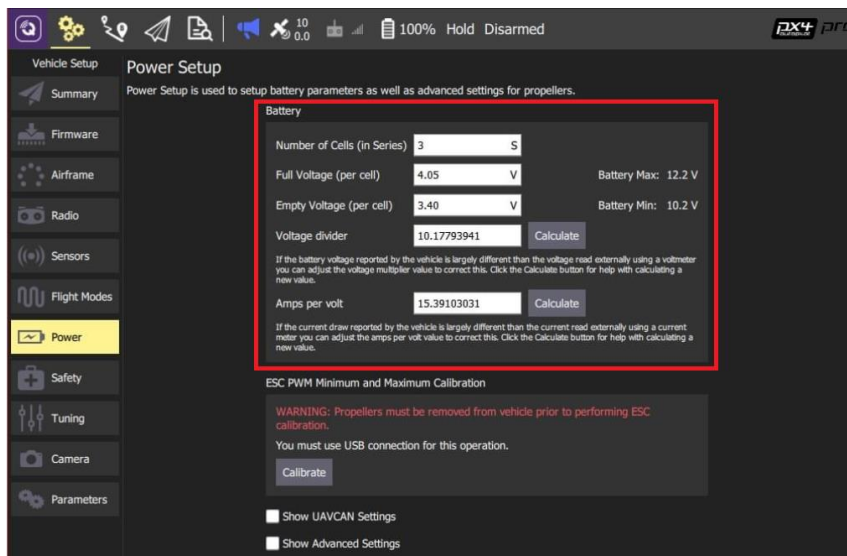


Ilustración 63. Configuración de los parámetros de la batería

## 6.10 ESCs

El objetivo de la calibración de los ESCs es ajustarlos para el valor máximo y mínimo de empuje según la configuración del Pixhawk. Para llevar a cabo dicha calibración, es imprescindible tener desconectados los motores y las hélices por motivos de seguridad. De igual forma, antes de comenzar el proceso, la batería también ha de estar desconectada para impedir que los ESCs estén energizados.

Para realizar el proceso de calibración ha de conectarse el dron al dispositivo, bien por USB directamente o bien mediante el módulo de tierra de la telemetría, y acceder al apartado *Power* dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente, que habilitará la sección *ESC PWM Minimum and Maximum Calibration*. Hacer clic en *Calibrate* para continuar con el proceso.



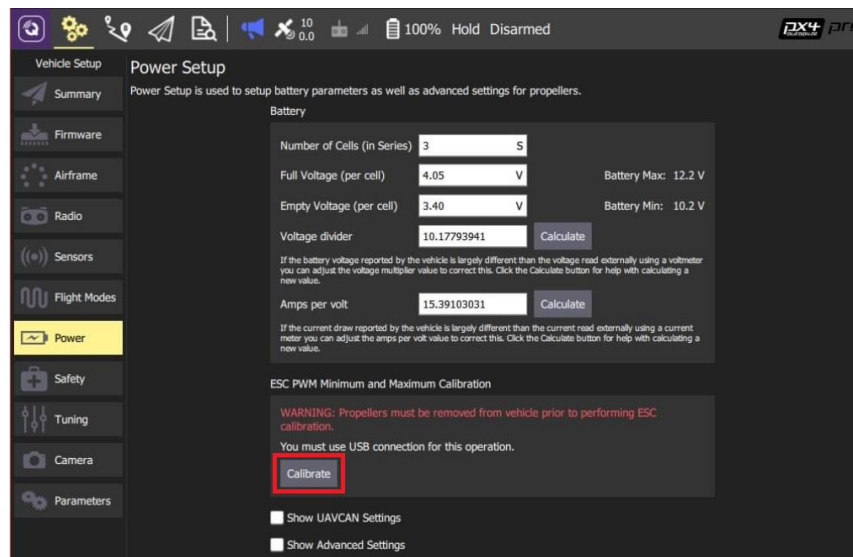


Ilustración 64. Proceso de calibración de los ESCs

Es en este momento cuando ha de conectarse la batería, tal y como anuncia el propio software, lo que dará comienzo al proceso de calibración de los ESCs de manera automática. Durante el proceso, una serie de sonidos indicarán que la calibración de cada ESC se está llevando a cabo de manera satisfactoria y aparecerá un mensaje cuando la calibración haya finalizado al completo.

## 6.11 Motores

El principal objetivo de la calibración de los motores es validar la asignación de cada motor y su sentido de giro. Para ello, las hélices han de permanecer desensambladas de los motores, mientras que la batería y los ESCs han de estar conectados.

Para llevar a cabo el proceso de calibración ha de conectarse el dron al dispositivo, bien por USB directamente o bien mediante el módulo de tierra de la telemetría, y acceder al apartado *Actuators* (o *Motors*, según la versión del software) dentro de la pestaña *Vehicle Setup* mencionada anteriormente. Desplazando hacia arriba cada dial asociado a cada motor dentro de la sección *Actuator Testing*, se hacen girar los motores. Es importante comprobar que los motores están girando en el sentido correcto para su posterior compatibilización con las hélices, eso es, dos motores CW y dos CCW, tal y como se indicaba en la Ilustración 41 y se aprecia en el esquema del dron situado en la sección *Geometry*.

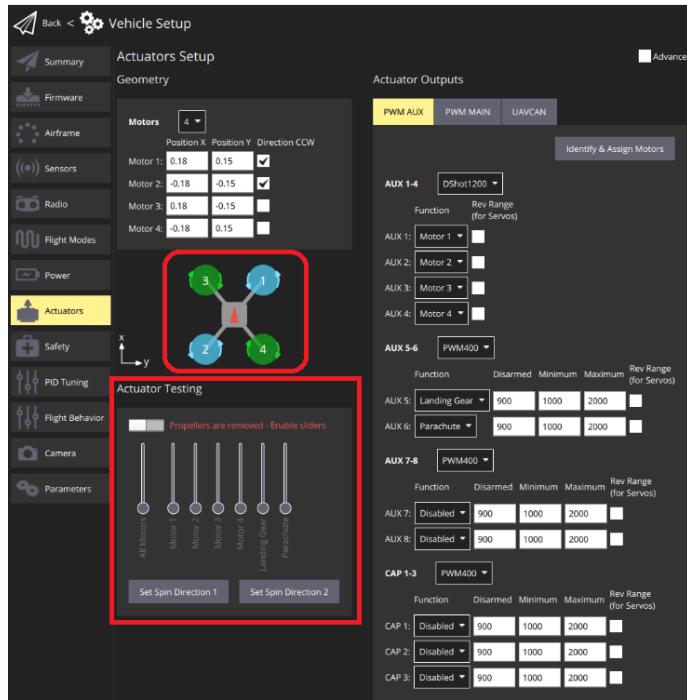


Ilustración 65. Proceso de calibración de los motores

# 7 ANÁLISIS DE ACTUACIONES

En el siguiente capítulo se analizan algunas de las principales actuaciones del dron, a nivel teórico y sin tener en consideración la normativa española vigente para el vuelo de drones, con el fin de obtener resultados que permitan la caracterización del comportamiento de este bajo condiciones previamente establecidas.

## 7.1 Caracterización previa del dron

Antes de comenzar con el análisis individual de cada una de las actuaciones del quadrotor, resulta necesario definir algunas de sus características físicas.

### 7.1.1 Peso del dron

Se muestra, a continuación, un desglose de la masa de cada uno de los componentes del dron, así como la masa y el peso total del conjunto:

Componente	Modelo	Masa unitaria [g] <sup>2</sup>	Cantidad	Masa total [g]
Carcasa (tren de aterrizaje, cuerpo, brazos, raíles para la batería, tornillería)	Marco S500	564	1	564
GPS	OCDAY NEO-M8N	40	2	80
Pixhawk (incluye telemetría 433/915 MHz)	ACHICOO Pixhawk PX4 PIX 2.4.8	33	1	33
Motor	SunnySky x2814 1000KV	110	4	440
ESC	ESC 40A	140	4	560
Hélice	APC 11*5.5	27	4	108
Batería	LiPo RC Battery 3s 11.1V 40C 8000mAh	580	1	580
<b>Masa total del dron:</b>				<b>2365 g = 2.365 kg</b>

Tabla 1. Desglose de las masas de los componentes

<sup>2</sup> La masa de cada componente ha sido medida en una balanza con una precisión de  $\pm 1$  gramos para obtener el valor más real posible.

Con todo ello, el peso total del dron puede calcularse como:  $W_{\text{dron}} = m_{\text{total}} \cdot g = 23.20 \text{ N}$ , siendo  $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$  la aceleración de la gravedad.

Además, se tomará para el análisis de actuaciones una masa adicional de 400 g asociada a un sistema de misión embarcado en el dron, con el objetivo de caracterizar el modelo de la manera más real y funcional posible. Así,  $W_{\text{Total}} = W_{\text{dron}} + W_{\text{misión}} = (m_{\text{total}} + m_{\text{misión}}) \cdot g = 27.12 \text{ N}$ .

Se considerarán constantes todos los pesos en apartados posteriores, puesto que la fuente de energía del dron es eléctrica y no se producirá desgaste de combustible durante el vuelo.

### 7.1.2 Geometría del dron

Puede caracterizarse el dron geoméricamente por medio de dos parámetros básicos, en base a [36]:

1. La diagonal de la carcasa,  $b$ , medida desde el eje de un motor hasta el opuesto. En este caso:  $b = 0.5 \text{ m}$ .
2. La superficie aproximada de referencia,  $S$ , que puede expresarse como:  $S = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2$ . En este caso,  $S = 0.0982 \text{ m}^2$ .

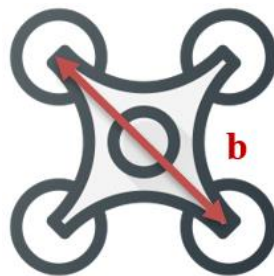


Ilustración 66. Vista en planta del dron

## 7.2 Atmósfera Estándar Internacional (ISA)

Las variables aerodinámicas que serán objeto de estudio en cada una de las actuaciones del dron dependen de la altitud de vuelo del vehículo a través de la densidad del aire en la atmósfera terrestre, tal y como se mostrará en los siguientes apartados. Debido a ello, resulta necesario disponer de un modelo de atmósfera que establezca dicha dependencia.

El modelo de atmósfera que se empleará en este trabajo es el modelo de Atmósfera Estándar Internacional o modelo ISA (International Standard Atmosphere) definido y regulado en ISO 2533:1975, que proporciona la temperatura, la presión y la densidad del aire en función de la altitud.

Considerando, como se comprobará más adelante, que el dron efectuará sus actuaciones en la troposfera, es decir, para altitudes  $h$  tales que  $h_0 \leq h \leq h_{\text{tropo}}$ , siendo  $h_0 = 0 \text{ m}$  la altitud a nivel del mar y  $h_{\text{tropo}} = 11000 \text{ m}$  la altitud de la tropopausa, se establecen a partir de [37] las siguientes ecuaciones que proporcionan la temperatura, la presión y la densidad del aire en función de la altitud:

$$\Theta = \Theta_0 - \alpha_T \cdot h \quad (7.2.1)$$

$$p = p_0 \cdot \left(1 - \frac{\alpha_T \cdot h}{\Theta_0}\right)^{\frac{g}{R_a \cdot \alpha_T}} \quad (7.2.2)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(1 - \frac{\alpha_T \cdot h}{\Theta_0}\right)^{\frac{g}{R_a \cdot \alpha_T} - 1} \quad (7.2.3)$$

donde  $\Theta_0 = 288.15$  K,  $p_0 = 1.01325 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup> y  $\rho_0 = 1.225$  kg/m<sup>3</sup> representan los valores de temperatura, presión y densidad del aire a nivel del mar, respectivamente,  $\alpha_T = 6.5 \cdot 10^{-3}$  K/m el gradiente térmico,  $R_a = 287.05$  J/(kg·K) la constante del aire y  $g = 9.80665$  m/s<sup>2</sup> la aceleración de la gravedad.

Se representa en las siguientes gráficas la evolución de la temperatura, la presión y la densidad del aire como función de la altitud en la troposfera:

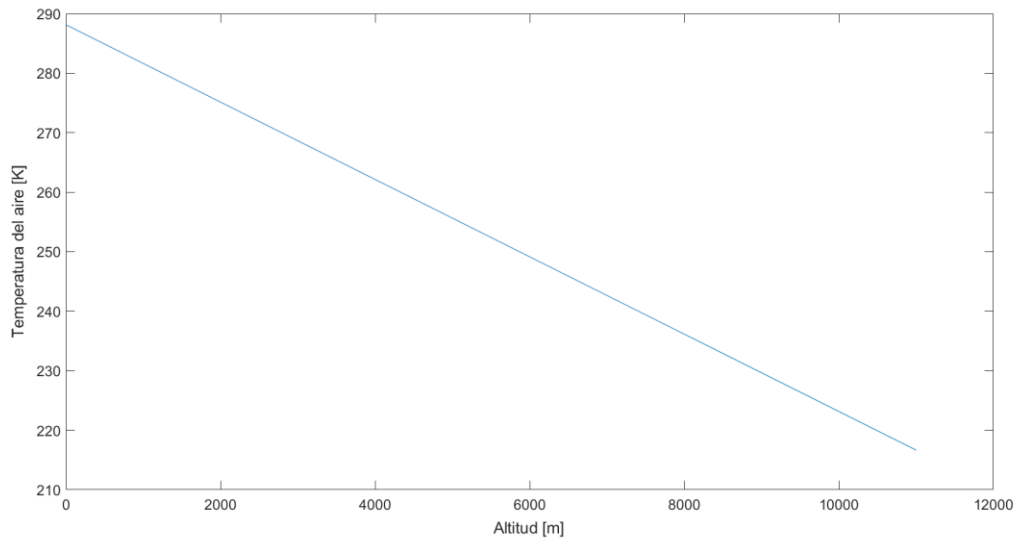


Ilustración 67. Evolución de la temperatura del aire con la altitud en la troposfera – modelo ISA

Un punto notable en esta curva es la altitud a la que se tienen 0°C (o lo que es lo mismo, 273.15 K) y que corresponde a unos 2307 metros. Este resultado puede obtenerse de manera numérica sustituyendo en la ecuación (7.2.1) el valor de la temperatura,  $\Theta$ , por 273.15 K.

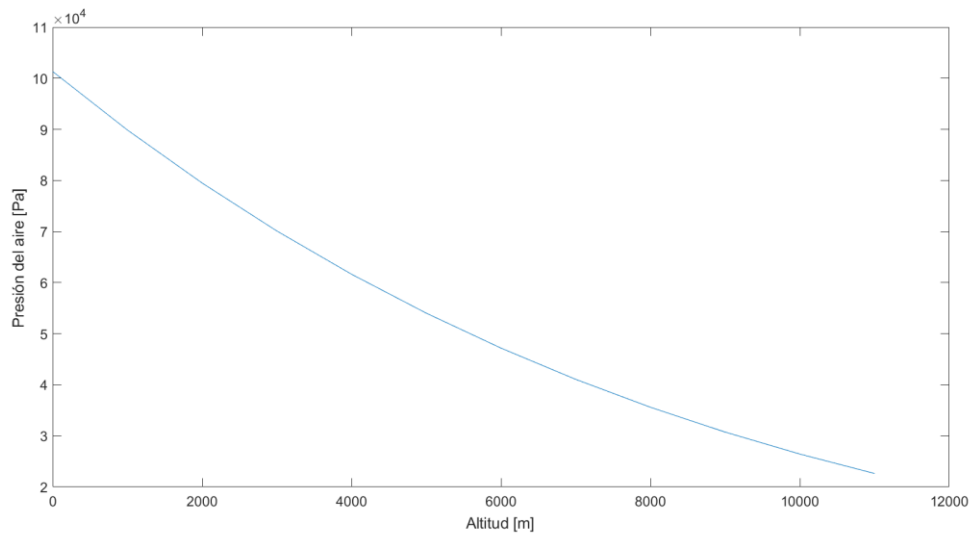


Ilustración 68. Evolución de la presión del aire con la altitud en la troposfera – modelo ISA

Esta presión es la fuerza que ejerce una columna de aire, por unidad de superficie, sobre un cuerpo a una altitud determinada. En esta curva cabe destacar que la presión a nivel del mar,  $p_0 = p(h = 0)$ , es de 101325 Pa o, lo que es equivalente, 1 atmósfera, por definición.

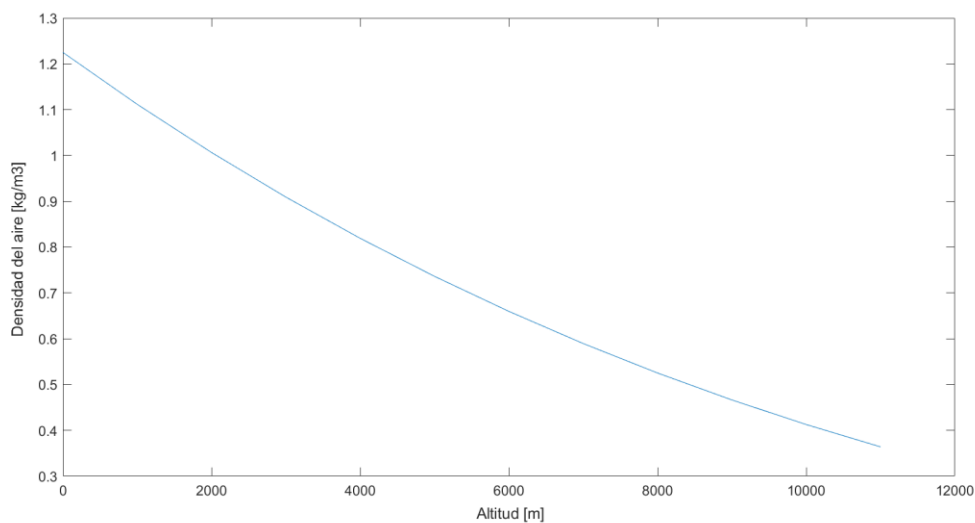


Ilustración 69. Evolución de la densidad del aire con la altitud en la troposfera – modelo ISA

## 7.3 Análisis de las actuaciones del dron

### 7.3.1 Velocidad máxima de ascenso

Se define la velocidad máxima de ascenso del dron como el valor máximo de la velocidad que puede alcanzar el dron durante el ascenso vertical para unos valores de peso y empuje previamente establecidos en la configuración del dron, es decir, la velocidad máxima a la que el dron es capaz de ascender verticalmente según diseño. Es necesario tener en cuenta que dicha velocidad máxima de ascenso se obtiene en la práctica aplicando el empuje máximo en la palanca de gases del mando transmisor del sistema de radiocontrol.

Para obtener su valor, se toman las siguientes consideraciones:

- (a) El ascenso se lleva a cabo al 80% de la velocidad máxima de giro de las hélices, puesto que el propio dron reserva un porcentaje del empuje disponible por motivos de maniobrabilidad durante el vuelo, en consonancia con [38]. Por su parte, la velocidad máxima de giro de las hélices,  $n_{m\acute{a}x}$ , ha sido previamente extraída del datasheet del motor seleccionando el valor asociado a la hélice y la batería (voltaje) correspondientes.

$$\text{Así, } n_{\text{disponible}} = 0.8 \cdot n_{m\acute{a}x} = 0.8 \cdot 9488 \text{ rpm} = 7590.4 \text{ rpm} = 794.86 \text{ rad/s.}$$

X2814 KV1000 拉力参数							
Prop (inch)	Voltage (V)	Amps (A)	Thrust (g)	Watts (W)	Efficiency (g/W)	RPM	Load temperature in 100% throttle 全油门时电机温度
APC13*6.5	11.1	5	500	55.5	9.01	3960	76°C 10min
		8.6	750	95.46	7.86	4832	
		13.2	1000	146.52	6.83	5590	
		18.2	1250	202.02	6.19	6203	
		24	1500	266.4	5.63	6767	
		31	1750	344.1	5.09	7330	
APC12*6	11.1	39	2000	432.9	4.62	7780	80°C 10min
		46.7	2287	518.37	4.41	7979	
		5.4	500	59.94	8.34	4100	
		9.3	750	103.23	7.27	5580	
		14	1000	155.4	6.44	6290	
		19	1250	210.9	5.93	6970	
APC12*8	11.1	26	1500	277.5	5.41	7620	65°C 10min
		31.5	1750	349.65	5.01	8157	
		41.3	2050	458.43	4.47	8687	
		5.6	500	62.16	8.04	4205	
		9.1	750	101.01	7.43	5061	
		15.2	1000	168.72	5.93	5862	
APC11*5.5	14.8	20.4	1250	226.44	5.52	6475	71°C 10min
		27.8	1500	308.58	4.86	7044	
		35.1	1750	389.61	4.49	7631	
		44.9	2070	498.39	4.15	8293	
		5.6	500	62.16	8.04	4205	
		9.55	750	106.005	7.08	6476	
APC11*5.5	14.8	14	1000	155.4	6.44	7438	71°C 10min
		19.4	1250	215.34	5.80	8304	
		25.4	1500	281.94	5.32	9044	
		29.8	1850	328.58	5.04	9458	
		4.4	500	65.12	7.68	5327	
		7.5	750	111	6.76	6481	
APC11*5.5	14.8	11	1000	162.8	6.14	7420	71°C 10min
		15.2	1250	224.96	5.56	8345	
		19.7	1500	291.56	5.14	8984	
		24.8	1750	367.04	4.77	9652	
		30.2	2000	446.96	4.47	10209	
		45.6	2550	674.88	3.79	11676	

Ilustración 70. Velocidad máxima de giro de las hélices

Imagen extraída de [22]

- (b) El ascenso se considera un proceso cuasiestacionario, es decir, se desprecia el régimen transitorio de ascenso durante el que se produce la aceleración partiendo del reposo, por lo que se considera que la aceleración es nula durante toda la parte considerada del ascenso ( $a = 0 \text{ m/s}^2$ ). Esto se puede justificar estimando el orden de magnitud del tiempo de ascenso transitorio, empleando una serie de valores aproximados que serán obtenidos en apartados posteriores (como adelanto,  $T = 40 \text{ N}$  se obtiene de la Ilustración 74, tomando  $h = 0 \text{ m}$ , a nivel del mar; y  $D = 11.63 \text{ N}$  se obtiene sustituyendo los datos para  $h = 0 \text{ m}$  en la expresión de la resistencia aerodinámica,  $D(h)$ ):

$$\begin{aligned} \sum \text{Fuerzas} &\sim \text{masa} \cdot \text{aceleración} \\ \text{aceleración} &\sim \frac{\sum \text{Fuerzas}}{\text{masa}} \sim \frac{T - D}{m} \sim \frac{40 \text{ N} - 11.63 \text{ N}}{2.8 \text{ kg}} \sim 10.13 \text{ m/s}^2 \\ t_{\text{transitorio}} &\sim \frac{\text{velocidad}}{\text{aceleración}} \sim \frac{22 \text{ m/s}}{10.13 \text{ m/s}^2} \sim 2 \text{ s} \end{aligned}$$

Donde  $T$  es el empuje (Thrust) del dron a nivel del mar, es decir, la fuerza que ejercen las hélices y  $D$  es la fuerza de resistencia aerodinámica a nivel del mar.

Como se demostrará más adelante, el tiempo que tarda el dron en alcanzar el techo de vuelo es  $t_{\text{vuelo}} \sim 5 \text{ min}$ , por lo que  $t_{\text{transitorio}} \ll t_{\text{vuelo}}$  y es posible despreciar el régimen transitorio de ascenso.

- (c) El ascenso tiene lugar en una línea vertical, es decir, sin inclinación del dron ( $\alpha = 0^\circ$ ), lo que se correspondería con una situación sin viento lateral, no siendo necesario que este sea compensado por una componente horizontal del empuje.
- (d) El ascenso se lleva a cabo en condiciones de viento en calma, es decir, sin la existencia de componentes de viento verticales ni horizontales.

Para determinar la velocidad máxima de ascenso, se plantea un equilibrio de fuerzas verticales sobre el cuerpo del dron justo en el instante en que este empieza a ascender desde una altitud determinada:

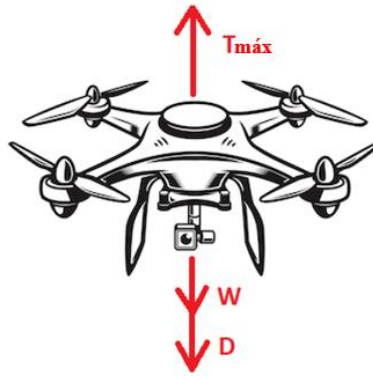


Ilustración 71. Equilibrio de fuerzas verticales sobre el dron

El equilibrio de fuerzas verticales resulta en:  $T_{\text{máx}}(h) - W - D(h) = m \cdot a = 0$ , donde  $D$  es la fuerza de resistencia aerodinámica, tal y como se mencionó anteriormente, y cuya expresión ha sido tomada de [37] como  $D(h) = \frac{1}{2} \cdot \rho(h) \cdot V_{\text{máxsub}}^2(h) \cdot S \cdot C_D$ . El coeficiente de resistencia aerodinámica,  $C_D$ , ha sido estimado con un valor de 0.4 en base a [39].

Con todo ello, el equilibrio de fuerzas verticales sobre el dron puede expresarse como:

$$T_{\text{máx}}(h) - W - \frac{1}{2} \cdot \rho(h) \cdot V_{\text{máxsub}}^2(h) \cdot S \cdot C_D = 0 \quad (7.3.1.1)$$

En este caso, puede obtenerse la expresión analítica de la velocidad máxima de ascenso de la ecuación anterior:

$$V_{\text{máxsub}}(h) = \sqrt{2 \cdot \frac{T_{\text{máx}}(h) - W}{\rho(h) \cdot S \cdot C_D}} \quad (7.3.1.2)$$



siempre que  $T_{\text{máx}}(h) - W > 0$ , es decir, siempre que el dron pueda compensar su propio peso con el empuje disponible.

La expresión del empuje máximo del dron como función de la altitud de vuelo,  $T_{\text{máx}}(h)$ , puede expresarse según [40] como:

$$T_{\text{máx}}(h) = k_T \cdot \rho(h) \cdot n_{\text{disponible}}^2 \cdot b^4 \quad (7.3.1.3)$$

donde  $k_T$  es una constante definida como  $k_T = \frac{T_{\text{máx}}}{\rho_0 \cdot n_{\text{disponible}}^2 \cdot b^4}$ , siendo  $T_{\text{máx}}$  la suma del empuje máximo disponible proporcionado por cada motor que conforma el dron.

Tomando como valores reales los proporcionados por el datasheet del motor, se tiene que  $T_{\text{máx}} = 4 \cdot T_{\text{motor}} \approx 4 \cdot 9.81 = 39.24$  N. El empuje máximo que proporciona cada motor,  $T_{\text{motor}}$ , se ha extraído del datasheet del propio motor seleccionando el valor asociado a la hélice y la batería (voltaje) correspondientes, extrapolando los valores para tener en cuenta que el dron opera al 80% de la velocidad máxima de giro de las hélices<sup>3</sup>:

X2814 KV1000 拉力参数							Load temperature in 100% throttle 全油门热程温度		
Prop (inch)	Voltage (V)	Amps (A)	Thrust (gf)	Watts (W)	Efficiency (g/W)	RPM			
APC13*6.5	11.1	5	500	55.5	9.01	3960	76°C 10min		
		8.6	750	95.46	7.86	4832			
		13.2	1000	146.52	6.83	5590			
		18.2	1250	202.02	6.19	6203			
		24	1500	266.4	5.63	6767			
		31	1750	344.1	5.09	7330			
		39	2000	432.9	4.62	7780			
		46.7	2287	518.37	4.41	7979			
APC12*6	11.1	5.4	500	59.94	8.34	4100	60°C 10min		
		9.3	750	103.23	7.27	5580			
		14	1000	155.4	6.44	6290			
		19	1250	210.9	5.93	6970			
		25	1500	277.5	5.41	7620			
		31.5	1750	349.65	5.01	8157			
APC12*8	11.1	5.6	500	62.16	8.04	4205	65°C 10min		
		9.1	750	101.01	7.43	5061			
		15.2	1000	168.72	5.93	5862			
		20.4	1250	226.44	5.52	6475			
		27.8	1500	308.58	4.86	7044			
		35.1	1750	389.61	4.49	7631			
APC11*5.5	14.8	4.4	500	65.12	7.68	5327	71°C 10min		
		7.5	750	111	6.76	6481			
		11	1000	162.8	6.14	7420			
		15.2	1250	224.96	5.56	8345			
		19.7	1500	291.56	5.14	8984			
		24.8	1750	367.04	4.77	9652			
		30.2	2000	446.96	4.47	10209			
		45.6	2556	674.88	3.79	11676			
		11.1	19.4	1250	215.34	5.80		8304	9488
		25.4	1500	281.94	5.32	9014			

Ilustración 72. Empuje máximo de cada motor

Imagen extraída de [22]

<sup>3</sup> El empuje viene expresado en unidades de gramo-fuerza (gf), siendo 1 gf = 9.81 e-3 N.

Se representa en la siguiente gráfica el empuje máximo del dron como función de la altitud de vuelo, sin tener en consideración el peso adicional del sistema de misión:

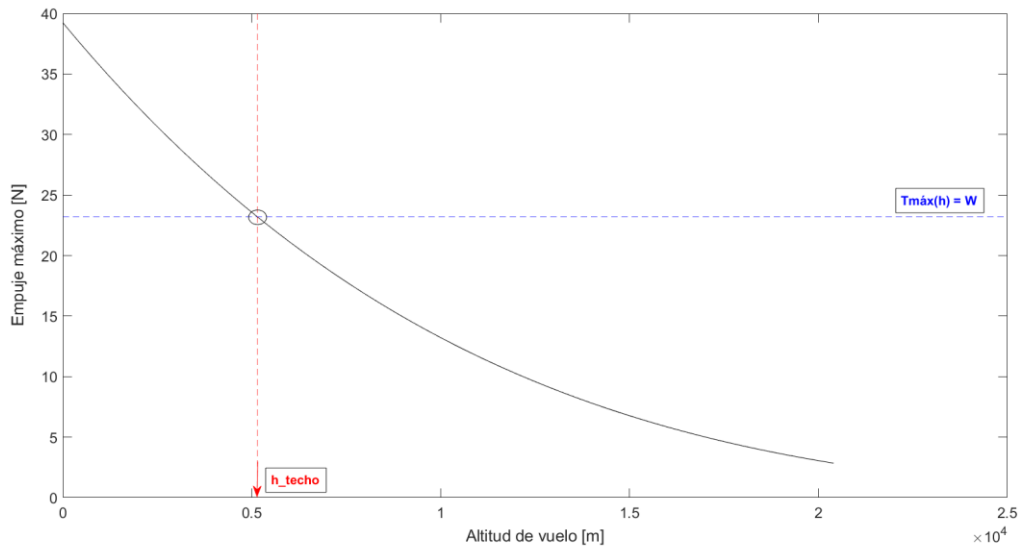


Ilustración 73. Empuje máximo como función de la altitud – sin sistema de misión

Puede observarse que el empuje máximo alcanza su mayor valor a nivel del mar ( $h = 0$ ) y se corresponde con el valor de  $T_{m\acute{a}x}$  calculado a partir de los datos extraídos del datasheet del motor:  $T(h = 0) = 39.24$  N. Este resultado puede justificarse analíticamente a través de la ecuación (7.3.1.3), dado que la dependencia del empuje máximo con la densidad del aire es lineal y esta disminuye a medida que la altitud de vuelo aumenta. De igual forma, se aprecia que existe una cota de vuelo para la que el empuje máximo coincide con el peso del dron y que define el techo teórico de vuelo del quadrotor:  $h_{techo} \approx 5150$  m. Se calculará de manera analítica esta magnitud en el apartado 7.3.3.

A continuación, se representa el empuje máximo del dron como función de la altitud de vuelo, teniendo en consideración el peso adicional del sistema de misión:

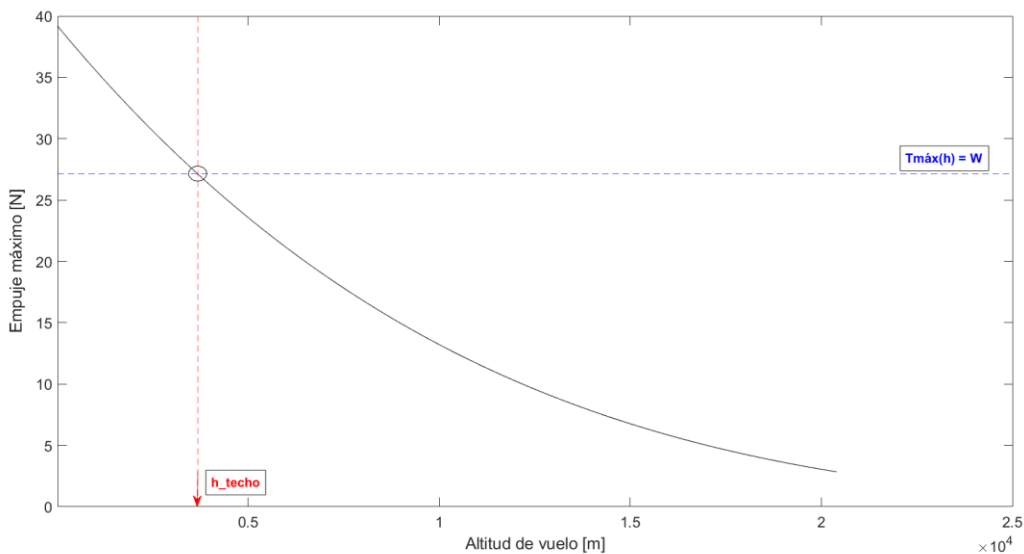


Ilustración 74. Empuje máximo como función de la altitud – con sistema de misión

Se observa cómo el techo teórico de vuelo desciende hasta un valor aproximado de 3685 metros al aumentar el peso total del conjunto. Por su parte, la curva del empuje máximo continúa siendo la misma que en el caso en que no se tiene en cuenta el sistema de misión, debido a que el empuje máximo no depende del peso tal y como refleja la ecuación (7.3.1.3).

Se representa en la siguiente gráfica la velocidad máxima de ascenso del dron en función de la altitud de vuelo a la que se inicia dicho ascenso partiendo del reposo, sin tener en consideración el peso adicional del sistema de misión:

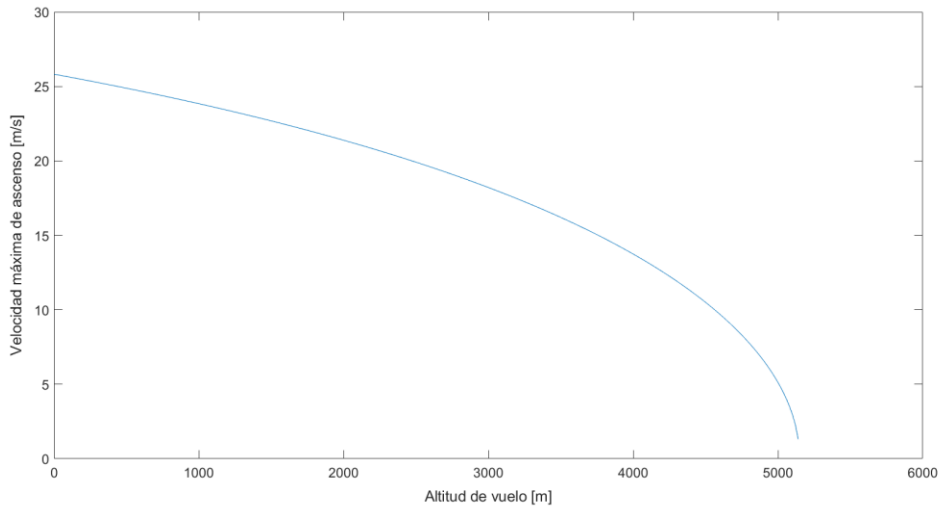


Ilustración 75. Velocidad máxima de ascenso como función de la altitud – sin sistema de misión

Puede observarse que la velocidad máxima de ascenso alcanza su valor más alto a nivel del mar ( $h = 0$ ), justo en el mismo punto donde el empuje máximo toma también su valor más alto:  $V_{\text{máxsub}}(h = 0) = 25.82 \text{ m/s}$ . También cabe destacar que existe una altitud de vuelo donde la velocidad máxima de ascenso se hace nula y que se corresponde con el techo teórico de vuelo del dron.

Se presenta a continuación la velocidad máxima de ascenso del dron en función de la altitud de vuelo a la que se inicia dicho ascenso partiendo del reposo, teniendo en consideración el peso adicional del sistema de misión:

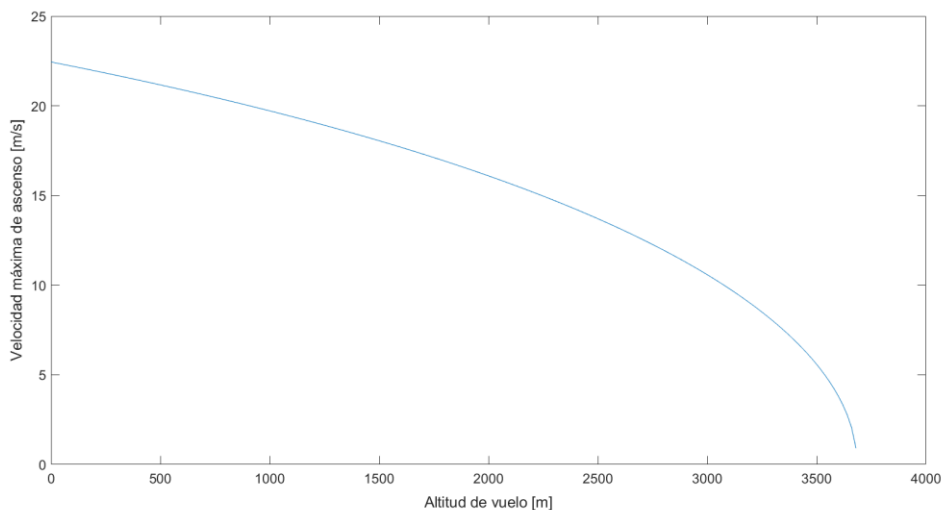


Ilustración 76. Velocidad máxima de ascenso como función de la altitud – con sistema de misión

Se aprecia cómo el valor más alto de la velocidad máxima de ascenso disminuye hasta 22.45 m/s al aumentar el peso total del conjunto, alcanzándose de igual forma este valor a nivel del mar.

### 7.3.2 Velocidad máxima de desplazamiento horizontal

Se define la velocidad máxima de desplazamiento horizontal del dron como el valor máximo de la velocidad que puede alcanzar el dron durante el desplazamiento horizontal para unos valores de peso y empuje previamente establecidos en la configuración del dron, es decir, la velocidad máxima a la que el dron es capaz de desplazarse horizontalmente según diseño. Es necesario tener en cuenta que dicha velocidad máxima de desplazamiento horizontal se obtiene en la práctica aplicando el empuje máximo en la palanca de gases del mando transmisor del sistema de radiocontrol.

Para obtener la velocidad máxima de desplazamiento horizontal del dron, se toman las siguientes consideraciones:

- (a) El desplazamiento horizontal se considera un proceso cuasiestacionario, es decir, se desprecia el régimen transitorio de desplazamiento durante el que se produce la aceleración partiendo del reposo, por lo que se considera que la aceleración es nula durante toda la parte considerada del desplazamiento horizontal ( $a = 0 \text{ m/s}^2$ ). Esto se puede justificar estimando el orden de magnitud del tiempo de desplazamiento horizontal transitorio, empleando una serie de valores aproximados que serán obtenidos en apartados posteriores (como adelanto,  $T = 39 \text{ N}$  se obtiene de la Ilustración 79, tomando  $h = 0 \text{ m}$ , a nivel del mar; y  $D = 27.81 \text{ N}$  se obtiene sustituyendo los datos para  $h = 0 \text{ m}$  en la expresión de la resistencia aerodinámica,  $D(h)$ ):

$$\begin{aligned} \Sigma \text{Fuerzas} &\sim \text{masa} \cdot \text{aceleración} \\ \text{aceleración} &\sim \frac{\Sigma \text{Fuerzas}}{\text{masa}} \sim \frac{T \cdot \cos \alpha - D}{m} \sim \frac{39 \text{ N} - 27.81 \text{ N}}{2.8 \text{ kg}} \sim 4 \text{ m/s}^2 \\ t_{\text{transitorio}} &\sim \frac{\text{velocidad}}{\text{aceleración}} \sim \frac{34 \text{ m/s}}{4 \text{ m/s}^2} \sim 8.5 \text{ s} \end{aligned}$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de inclinación o balanceo del vehículo, que es aquel que forma el plano de las hélices del dron con el plano horizontal, tal y como se muestra en la siguiente ilustración:

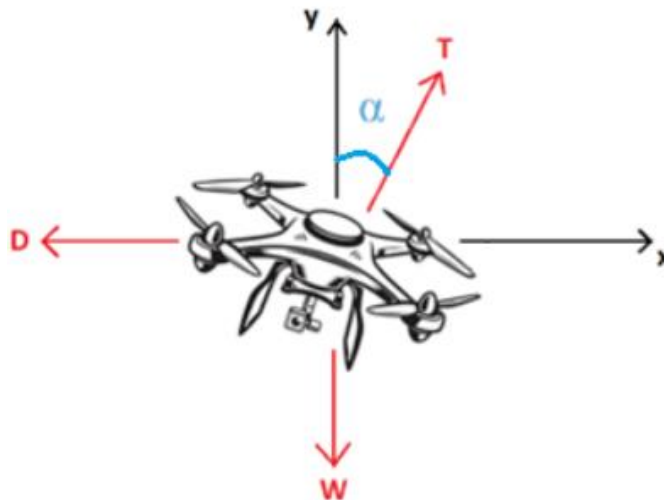


Ilustración 77. Vuelo horizontal del dron

Como se demostrará más adelante,  $t_{\text{vuelo}} \sim 11 \text{ min}$ , por lo que  $t_{\text{transitorio}} \ll t_{\text{vuelo}}$  y es posible despreciar el régimen transitorio de ascenso.

- (b) El desplazamiento horizontal se lleva cabo en una línea horizontal con una cierta inclinación del dron, definiéndose el ángulo de inclinación o balanceo del vehículo como  $\alpha$ , mostrado en la Ilustración 77.
- (c) El desplazamiento horizontal se lleva a cabo en condiciones de viento en calma, es decir, sin la existencia de componentes de viento verticales ni horizontales. No obstante, la velocidad máxima de desplazamiento horizontal es equivalente a la velocidad máxima del viento a la que el dron puede estar sujeto para mantener un vuelo estable.

Con todo ello, se plantea un sistema de ecuaciones que describen el equilibrio de fuerzas, tanto verticales como horizontales, que actúan sobre el cuerpo del dron:

$$\begin{cases} T_{\text{máx}}(h) \cdot \cos\alpha_{\text{máx}}(h) = W & (7.3.2.1) \\ T_{\text{máx}}(h) \cdot \text{sen}\alpha_{\text{máx}}(h) = D = \frac{1}{2} \cdot \rho(h) \cdot V_{\text{máxhor}}^2(h) \cdot S \cdot C_D & (7.3.2.2) \end{cases}$$

En este caso, también es posible obtener una expresión analítica para la velocidad máxima de desplazamiento horizontal:

$$V_{\text{máxhor}}(h) = \sqrt{2 \cdot \frac{W \cdot \text{tg}\alpha_{\text{máx}}(h)}{\rho(h) \cdot S \cdot C_D}} \quad (7.3.2.3)$$

Se representa a continuación el empuje del dron en función del ángulo de balanceo, sin tener en consideración el peso adicional del sistema de misión:

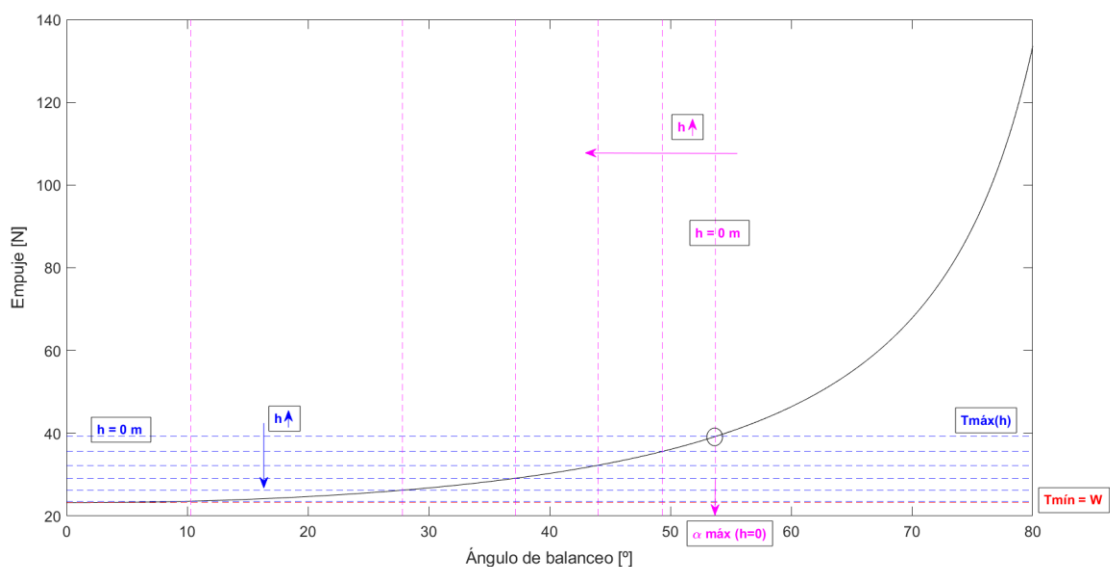


Ilustración 78. Empuje del dron como función del ángulo de balanceo – sin sistema de misión

En esta gráfica, las líneas discontinuas azules representan valores de empuje máximo para distintas altitudes de vuelo, disminuyendo dicho empuje máximo a medida que aumenta la altitud. A su vez, las líneas discontinuas rosas representan los ángulos de balanceo máximos asociados a los empujes máximos obtenidos, disminuyendo dicho ángulo de balanceo máximo a medida que aumenta la altitud.

Con todo ello, la región factible ha sido acotada, para cada cota de vuelo, por los siguientes valores del empuje:  $T_{\min} = W$ , que es el empuje necesario para que el dron pueda alzar el vuelo, y el empuje máximo a dicha altitud,  $T_{\max}(h)$ , que proporciona el ángulo de balanceo máximo para cada cota de vuelo. Dado que a nivel del mar el empuje máximo toma su valor más alto, el mayor valor del ángulo de balanceo máximo del dron durante el vuelo horizontal también se alcanza a dicha altitud de vuelo y toma un valor de  $53.76^\circ$ .

Se presenta en la siguiente gráfica empuje del dron en función del ángulo de balanceo, teniendo en consideración el peso adicional del sistema de misión:

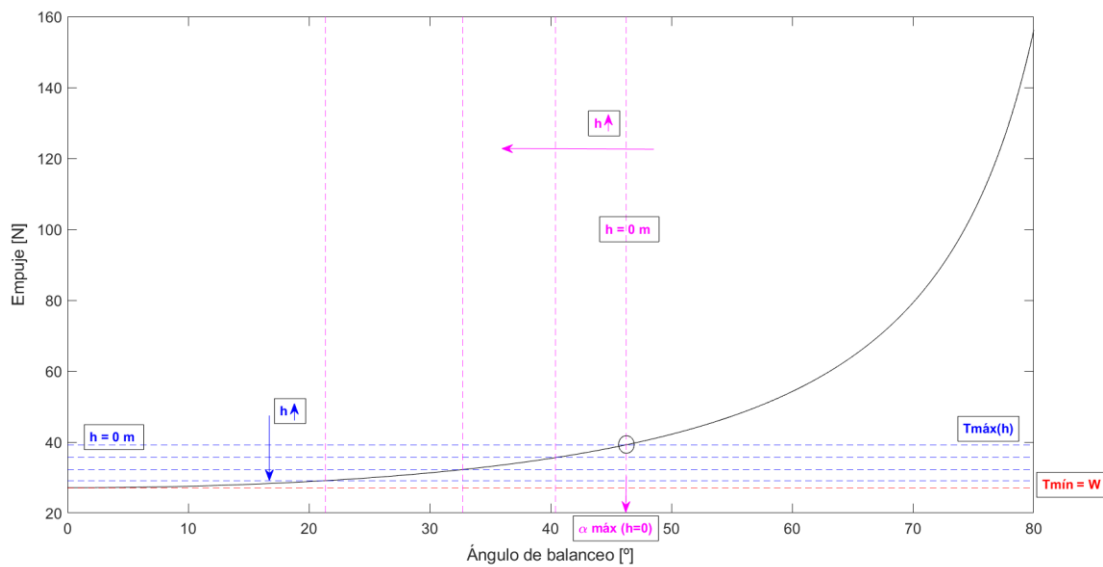


Ilustración 79. Empuje del dron como función del ángulo de balanceo – con sistema de misión

Se observa cómo el mayor valor del ángulo de balanceo máximo del dron para desplazamiento horizontal disminuye hasta  $46.27^\circ$  al aumentar el peso total del conjunto, alcanzándose de igual forma este valor a nivel del mar.

Se representa en la siguiente gráfica el ángulo de balanceo máximo para velocidad de desplazamiento horizontal máxima en función de la altitud de vuelo, sin tener en consideración el peso adicional del sistema de misión:

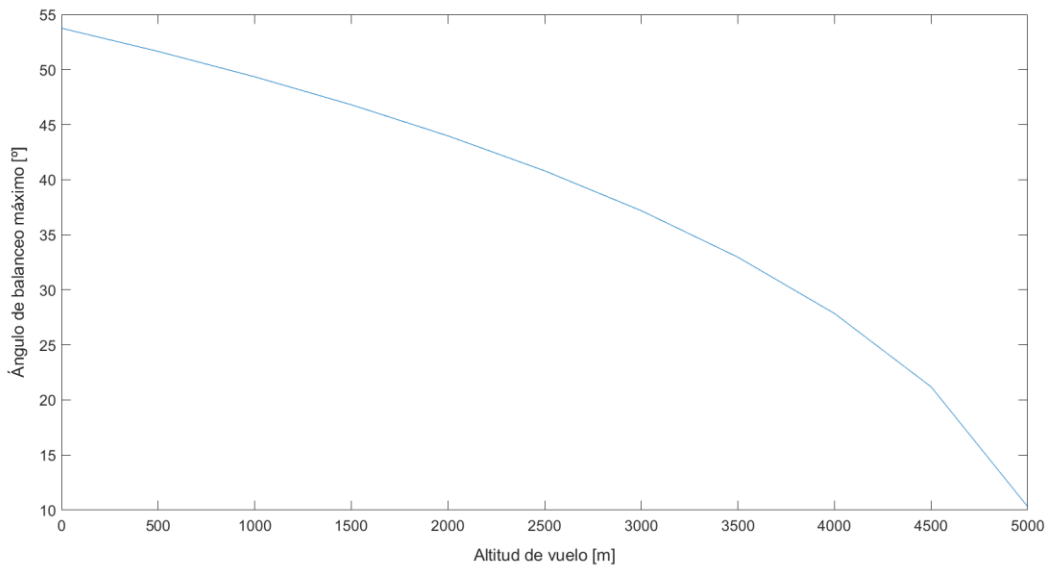


Ilustración 80. Ángulo de balanceo máximo como función de la altitud – sin sistema de misión

Se aprecia que el ángulo de balanceo máximo para desplazamiento horizontal disminuye a medida que la altitud de vuelo del dron aumenta, resultado que puede justificarse analíticamente a través de la ecuación (7.3.2.1), dado que el empuje máximo también disminuye a medida que la cota de vuelo aumenta.

A continuación, se representa el ángulo de balanceo máximo para velocidad de desplazamiento horizontal máxima en función de la altitud de vuelo, teniendo en consideración el peso adicional del sistema de misión:

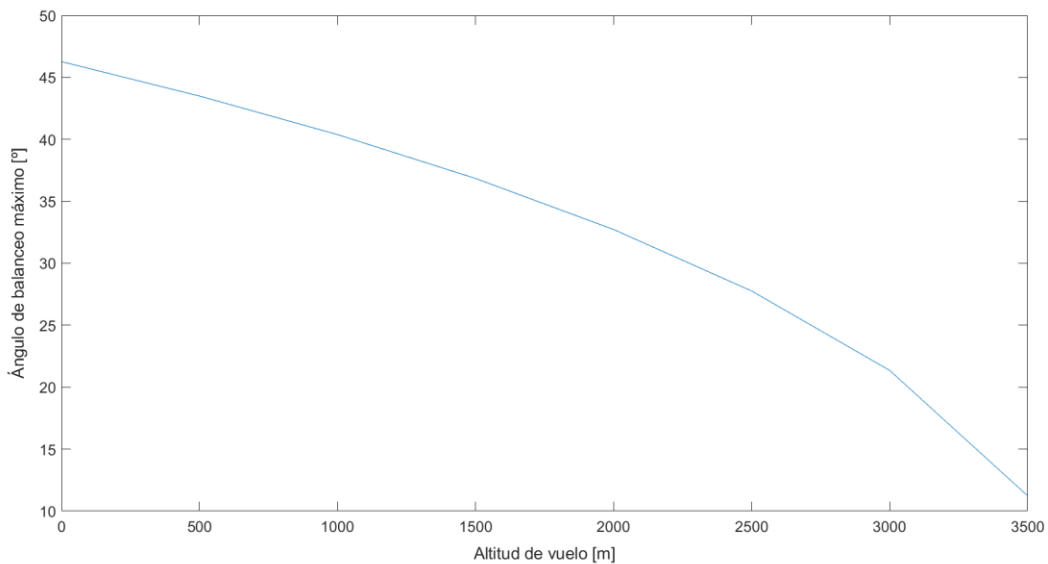


Ilustración 81. Ángulo de balanceo máximo como función de la altitud – con sistema de misión

Por otro lado, a través de la ecuación (7.3.2.3) se observa que la velocidad máxima de desplazamiento horizontal depende tanto del ángulo de balanceo máximo como de la altitud de vuelo. Se representa, a continuación, la velocidad máxima de desplazamiento horizontal del dron en función de la altitud de vuelo, sin tener en consideración el peso adicional del sistema de misión:

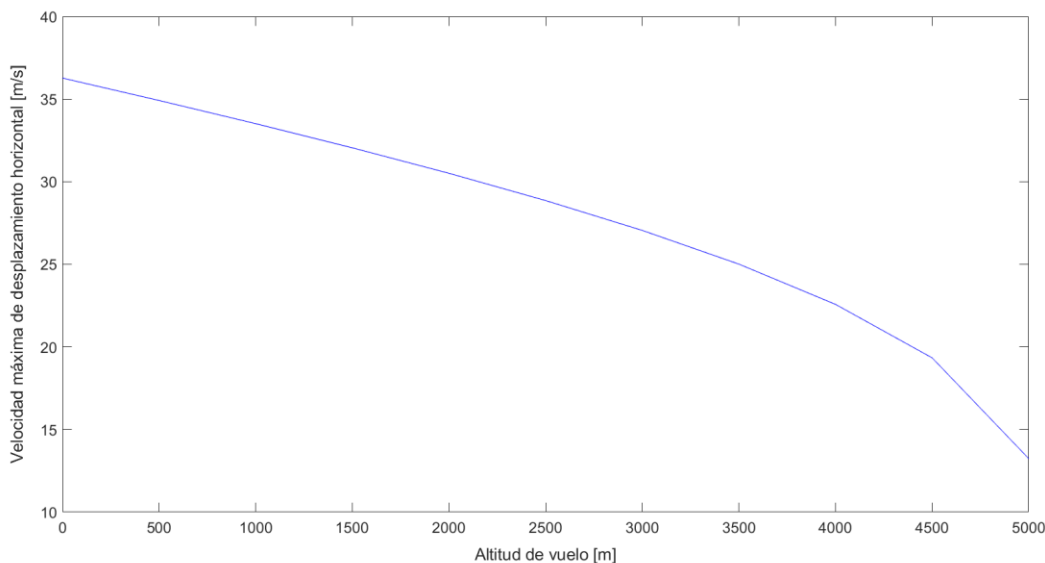


Ilustración 82. Velocidad máxima de desplazamiento horizontal como función de la altitud – sin sistema de misión

Puede observarse que la velocidad máxima de desplazamiento horizontal alcanza su valor más alto a nivel del mar ( $h = 0$ ):  $V_{\text{máxhor}}(h = 0) = 36.27 \text{ m/s}$ .

Se presenta en la siguiente gráfica la velocidad máxima de desplazamiento horizontal del dron en función de la altitud de vuelo, teniendo en consideración el peso adicional del sistema de misión:

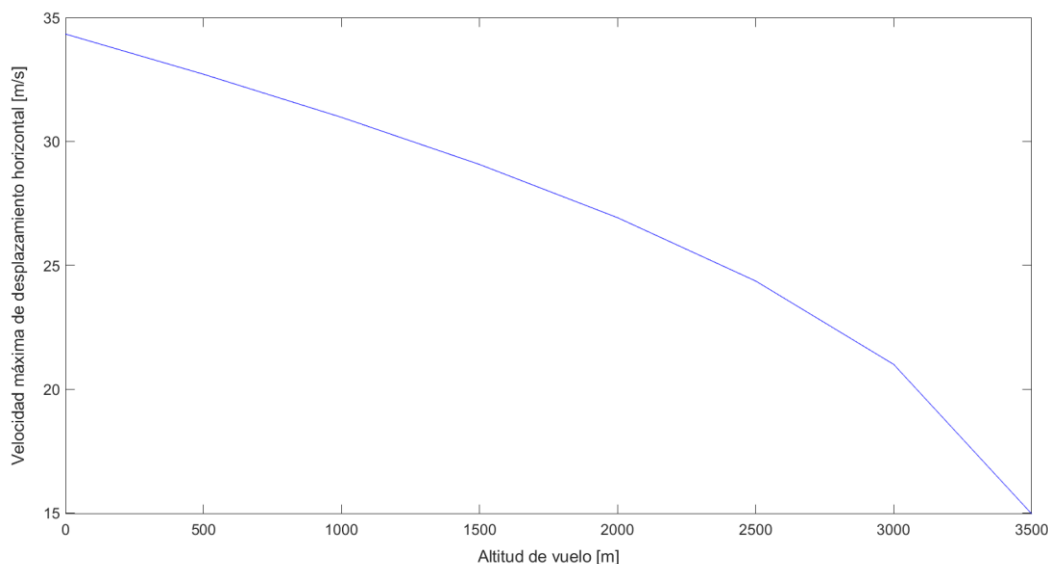


Ilustración 83. Velocidad máxima de desplazamiento horizontal como función de la altitud – con sistema de misión

Se aprecia cómo el mayor valor de la velocidad máxima de desplazamiento horizontal disminuye hasta 34.33 m/s al aumentar el peso total del conjunto, alcanzándose de igual forma este valor a nivel del mar.



### 7.3.3 Techo de vuelo

Se define el techo teórico de vuelo del dron en [37] como la cota máxima de vuelo que puede alcanzar para permanecer en equilibrio estático, esto es, la altura máxima a la que es posible el vuelo del dron, dados un peso y un empuje máximo fijos.

En particular, se verifica que el techo teórico es la altitud a la cual el empuje máximo del dron coincide con el empuje necesario mínimo para poder alzar el vuelo, que no es otro que el peso del propio dron. De esta forma, la ecuación a resolver es:  $T_{\text{máx}}(h) = W = \text{constante}$ . Sustituyendo la expresión del empuje máximo del dron, dada anteriormente en la ecuación (7.3.1.3), resulta:

$$k_T \cdot \rho_{\text{techo\_teórico}} \cdot n_{\text{disponible}}^2 \cdot b^4 = W \quad (7.3.3.1)$$

De donde es posible obtener el valor de la densidad en el techo teórico de vuelo:  $\rho_{\text{techo\_teórico}} = \frac{W}{k_T \cdot n_{\text{disponible}}^2 \cdot b^4}$ . Por último, se obtiene la altitud máxima teórica asociada a dicho valor de la densidad a través de la ecuación (7.2.3) del modelo de atmósfera ISA, dando como resultado unos 5150 metros en el caso en que no se tiene en cuenta el sistema de misión adicional y unos 3685 metros en el caso en que sí se tiene en consideración el peso de dicho sistema, resultados que coinciden con los obtenidos en la Ilustración 73 y en la Ilustración 74.

No obstante, distintas limitaciones en la configuración de diseño del dron impiden alcanzar el techo teórico de vuelo en la práctica. De esta forma, se define el techo operativo de vuelo como la altitud máxima que puede alcanzar el dron cumpliendo correctamente las funciones para las que ha sido diseñado previamente.

En este caso, el factor más limitante es la energía disponible almacenada en la batería, que puede expresarse como:

$$\text{Energía} = \int_0^t \text{consumo}(t) dt = \int_0^h \text{consumo}(h) \frac{dh}{dh} dt = \int_0^h \frac{\text{consumo}_{T(h)}}{V_{\text{sub}}(h)} dh \quad (7.3.3.2)$$

con  $V_{\text{sub}}$  extraída de la ecuación (7.3.1.2).

Se ha obtenido una expresión para el consumo mediante interpolación cuadrática a partir de los datos de empuje y potencia consumida extraídos del datasheet del motor, teniendo en cuenta que los valores tomados del datasheet están asociados a cada motor de manera individual:

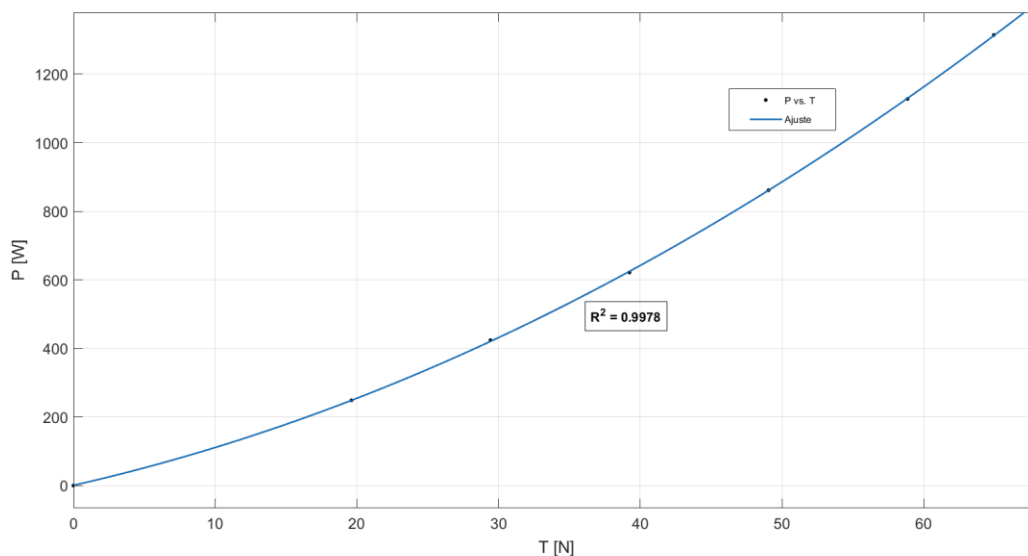


Ilustración 84. Consumo como interpolación cuadrática

$$\text{consumo}_{T(h)} = 0.1669 \cdot T(h)^2 + 9.356 \cdot T(h) + 0.6202 \quad (7.3.3.3)$$

con  $T(h)$  extraído de la ecuación (7.3.1.3).

Considerando la velocidad de giro de las hélices como  $n = 0.8 \cdot n_{\text{máx}}$ , tal y como se ha venido haciendo en cálculos anteriores, podrían presentarse dos escenarios:

- 1) El dron asciende hasta una altitud tal que anula la energía disponible almacenada en la batería, lo que proporciona el valor del techo operativo.
- 2) El dron asciende hasta una altitud tal que, aunque se dispone de energía almacenada en la batería, el empuje disponible no es suficiente para contrarrestar el peso del dron, lo que acota el valor del techo operativo.

Conociendo el valor de la energía almacenada en la batería a través de los datos de diseño extraídos del datasheet de la batería,  $\text{Energía} = 11.1 \text{ V} \cdot 8 \text{ Ah} = 88.8 \text{ Wh}$ , se observa mediante la resolución numérica del problema que se dispone de suficiente energía almacenada en la batería para alcanzar el techo de vuelo teórico, siendo entonces el empuje disponible el factor limitante. Todo ello deriva en que el techo operativo del dron coincide con el techo teórico calculado anteriormente, esto es, unos 5150 metros en el caso en que no se tiene en cuenta el peso asociado al sistema de misión adicional y unos 3685 metros en el caso en que se tiene en consideración el peso adicional del sistema de misión. Los tiempos de vuelo del dron para alcanzar ambos techos de vuelo son de unos 6 minutos y 5 minutos, respectivamente.

Por su parte, la energía disponible en la batería cuando el dron alcanza el techo de vuelo es de 48.73 Wh en el caso en que no se tiene en cuenta el peso adicional del sistema de misión y de 50.8 Wh en el caso en que se tiene en consideración el peso adicional del sistema de misión, lo que permitiría al dron regresar al suelo y aterrizar de manera controlada en ambos casos.

### 7.3.4 Alcance

Se define el alcance como la distancia horizontal máxima total que es capaz de recorrer el dron sin que se agote la batería, considerando que el dron ha de regresar de manera controlada a su punto de partida.

Tomando las mismas consideraciones que para el análisis de la velocidad máxima de desplazamiento horizontal del apartado 7.3.2 y sin tener en consideración la distancia máxima de enlace entre el sistema de radiocontrol y el dron, se representa en la siguiente gráfica, para cada altitud de vuelo, la evolución del alcance del dron como función del ángulo de balanceo, sin tener en consideración el peso adicional del sistema de misión:

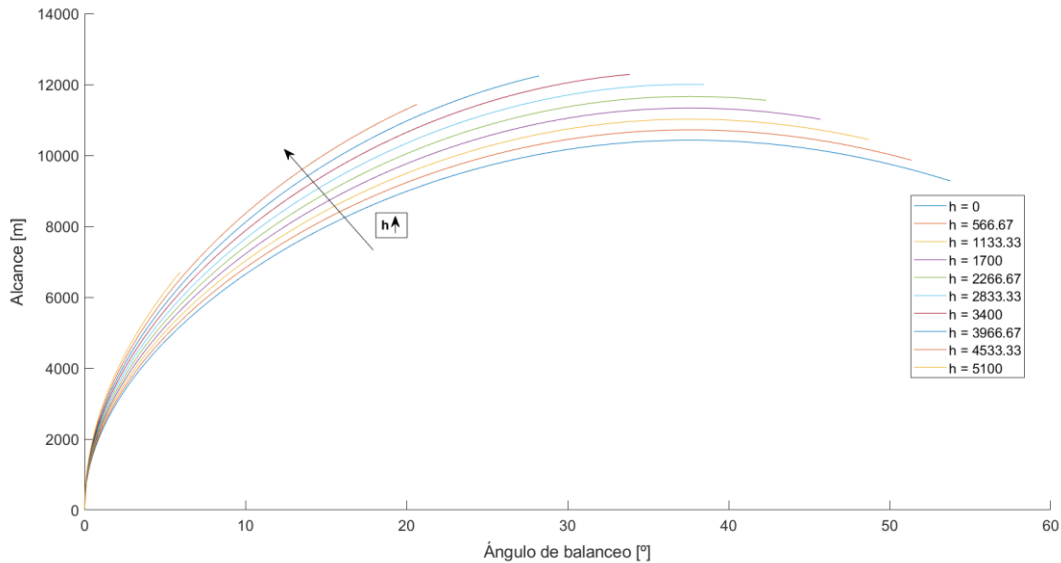


Ilustración 85. Alcance como función del ángulo de balanceo – sin sistema de misión

Se observa que existe una cota de vuelo que maximiza el alcance, siendo dicho alcance 12284 metros aproximadamente y la altitud de vuelo de unos 3400 metros. Por su parte, el tiempo de vuelo para recorrer el alcance máximo toma un valor aproximado de 14 minutos y la velocidad de desplazamiento horizontal un valor aproximado de 30 m/s.

También puede extraerse de la gráfica que, independientemente de la altitud de vuelo, existe un ángulo de balanceo que maximiza el alcance y que toma un valor aproximado de 34°.

Se presenta a continuación, para cada altitud de vuelo, la evolución del alcance del dron como función del ángulo de balanceo, teniendo en consideración el peso adicional del sistema de misión:

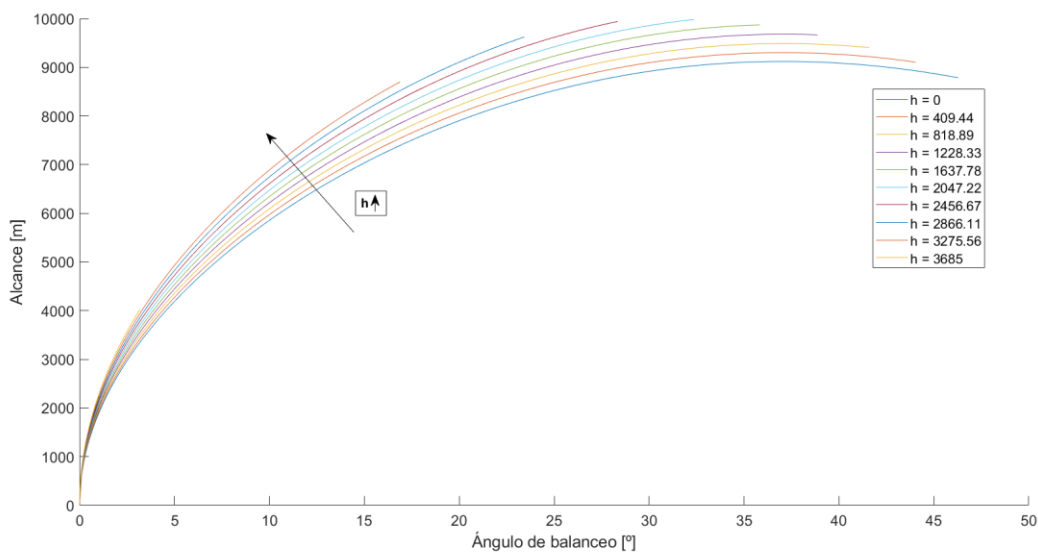


Ilustración 86. Alcance como función del ángulo de balanceo – con sistema de misión

Se observa cómo, al aumentar el peso total del conjunto, disminuyen tanto el alcance como la altitud de vuelo que lo maximiza, tomando un valor de unos 9983 metros y unos 2038 metros, respectivamente. Por su parte, el tiempo de vuelo para recorrer el alcance máximo toma un valor aproximado de 11 minutos y la velocidad de desplazamiento horizontal un valor aproximado de 30 m/s.

De igual forma, el ángulo de balanceo que maximiza el alcance de manera independiente a la altitud de vuelo desciende a un valor de 32° aproximadamente.

Se muestra a continuación, para cada cota de vuelo del dron, la evolución de la velocidad de desplazamiento horizontal como función del ángulo de balanceo, sin tener en consideración el peso adicional del sistema de misión:

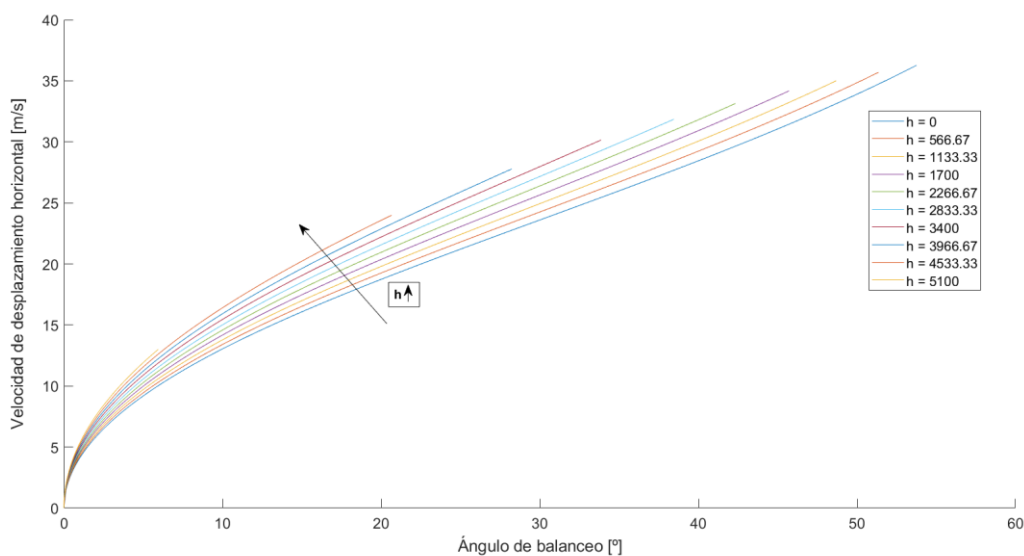


Ilustración 87. Velocidad de desplazamiento horizontal como función del ángulo de balanceo – sin sistema de misión

Puede observarse que, para cada altitud de vuelo, la velocidad de desplazamiento horizontal aumenta a medida que aumenta el ángulo de balanceo, alcanzando su valor máximo cuando el ángulo de balanceo también es máximo, tal y como se ha demostrado en el apartado 7.3.2. Además, se aprecia que la velocidad de desplazamiento horizontal alcanza su valor máximo a nivel del mar ( $h = 0$ ):  $V_{\text{máxhor}}(h = 0) = 36.27 \text{ m/s}$ , resultado que también fue obtenido con anterioridad en el mismo apartado.

Se representa en la siguiente gráfica, para cada cota de vuelo del dron, la evolución de la velocidad de desplazamiento horizontal como función del ángulo de balanceo, teniendo en consideración el peso adicional del sistema de misión:

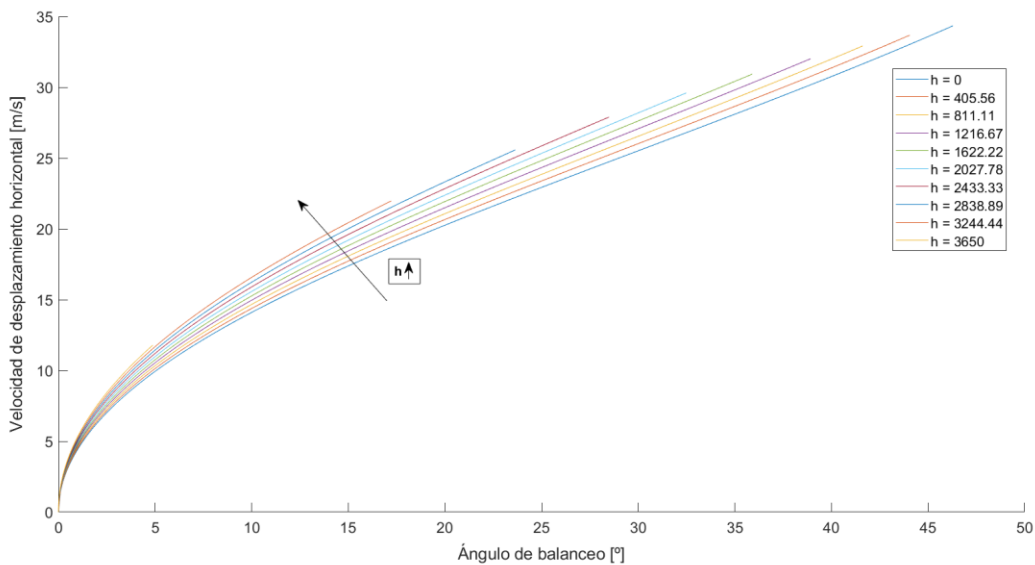


Ilustración 88. Velocidad de desplazamiento horizontal como función del ángulo de balanceo – con sistema de misión

Se observa cómo, al aumentar el peso total del conjunto, disminuye el valor máximo de la velocidad de desplazamiento horizontal, siendo  $V_{\text{máxhor}}(h = 0) = 34.33 \text{ m/s}$ , resultado que también fue obtenido con anterioridad en el apartado 7.3.2.



## 8 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

En definitiva, a lo largo de este trabajo se ha generado, tal y como se pretendía, una guía básica de referencia que permitirá al usuario conocer las características básicas de los drones, las partes que los componen, las distintas tipologías existentes y las nociones básicas sobre normativa aplicada a drones a fecha de elaboración de este documento. Además, le guiará de manera razonada en el diseño de un dron y la selección de sus componentes, en base a distintos requisitos según la misión que deba realizar el dron.

A lo largo de este trabajo, se ha definido en detalle el proceso de ensamblaje y de preparación previa al vuelo de un dron de tipo quadrotor, detallando el uso de la suite de software *QGroundControl* en conjunto con un controlador de código libre tipo Pixhawk para configurar el dron construido. Además, se han determinado las actuaciones y el rango de capacidades del dron, que permiten estimar si el vehículo junto a su sistema de misión sería capaz de cumplir con los requisitos de la misión tipo.

Como líneas de trabajo interesantes a desarrollar se encuentran:

- La validación de los resultados obtenidos mediante datos de vuelo de un dron real, para lo que es necesario un ámbito de laboratorio o un área donde poder volar el dron sin restricciones, así como un piloto certificado para poder llevar a cabo las actuaciones comentadas en esta memoria.
- El análisis de sensibilidad sobre los resultados obtenidos con el objetivo de analizar qué componentes del dron pueden tener un mayor efecto sobre las características y actuaciones del dron que se pretendan mejorar (capacidad de carga, autonomía, alcance, agilidad, etc.). En este análisis ha de tenerse en cuenta que los componentes que den como resultado la mejora de dichas características y actuaciones pueden no existir en el mercado comercial, debiéndose elegir aquellos más similares.
- La realización de este tipo de análisis de actuaciones sobre diferentes tipologías de dron, con el objetivo de poder establecer una comparativa entre ellas.
- El desarrollo de una guía de programación del controlador de vuelo que permita al dron ejecutar las diferentes actuaciones propuestas en este trabajo de manera autónoma mediante la preconfiguración de rutas de vuelo.





# REFERENCIAS

---

- [1] «¿Qué es un Drone y para qué sirve?» IDC, [En línea]. Available: <https://idc.apddrones.com/educacion/que-es-un-drone-y-para-que-sirve/>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [2] «RPAS, UAS y UAV: ¿Qué son y en qué se diferencian?» UMILES GROUP, 19 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://umilesgroup.com/rpas-uas-uav-diferencias/>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [3] «Evolución del UAV Reaper,» *El Radar*, pp. <https://www.elradar.es/evolucion-del-uav-reaper/>, 17 Noviembre 2021.
- [4] «X-47B Unmanned Combat Air System (UCAS),» Naval Technology, 19 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.naval-technology.com/projects/x-47b-unmanned-combat-air-system-carrier-ucas/>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [5] «Drones de Ala Fija: Qué son, características y usos en 2023,» UMILES GROUP, 9 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://umilesgroup.com/dron-ala-fija/>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [6] «Unmanned Helicopters and Helicopter Drones,» [En línea]. Available: [unmannedsystemstechnology.com](http://unmannedsystemstechnology.com). [Último acceso: Mayo 2024].
- [7] D. Kanu y R. Fernández, «ADC/PP - Altimetría,» Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://files.es.iviao.aero/formacion/documentos/ADC/Altimetria.pdf>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [8] «Altitude, Height and Elevation,» SICAMI TRACKS, 19 Noviembre 2022. [En línea]. Available: <https://sicami.com/en/article/informacion-tecnica-y-curiosidades/altitud-altura-elevacion>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [9] «DJI Agriculture,» [En línea]. Available: <https://ag.dji.com/es>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [10] «Normativa de Drones en España 2024,» One Air, [En línea]. Available: <https://www.oneair.es/normativa-drones-espana-aea/>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [11] «Reglamento Europeo de Drones 2024,» One Air, [En línea]. Available: <https://www.oneair.es/normativa-drones-espana-aea/>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [12] «AESA: Agencia Estatal de Seguridad Aérea. ¿Tienes un UAS/dron?,» Gobierno de España - Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, [En línea]. Available: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/tienes-un-uas-dron>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [13] «EnAire Drones,» [En línea]. Available: <https://drones.enaire.es/>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [14] «Historia de los drones,» [En línea]. Available: <https://huescadrones.es/hddrones/historia-de-los-drones/>. [Último acceso: Junio 2024].

- [15] J. Jones, «The First Air Raid Happened When Austria Dropped Bombs on Venice from Pilotless Hot-Air Balloons (1849),» Open Culture, 7 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.openculture.com/2021/09/the-first-air-raid-in-history.html>. [Último acceso: Junio 2024].
- [16] N. Budanovic, «The Early Days Of Drones – Unmanned Aircraft From World War One And World War Two,» War History Online, 15 Enero 2017. [En línea]. Available: <https://www.warhistoryonline.com/military-vehicle-news/short-history-drones-part-1.html>. [Último acceso: Junio 2024].
- [17] R. Naughton, «Remoted Piloted Aerial Vehicles : An Anthology,» 2 Febrero 2003. [En línea]. Available: [https://ctie.monash.edu/hargrave/rpav\\_home.html](https://ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html). [Último acceso: Junio 2024].
- [18] R. Valdes y D. Bowie, «The Predator Drone: A Pioneering Force in Modern Warfare,» How Stuff Works, 20 Septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://science.howstuffworks.com/predator.htm>. [Último acceso: Junio 2024].
- [19] «EHang AAV: The Era of Urban Air Mobility is Coming,» [En línea]. Available: <https://www.ehang.com/ehangaav>. [Último acceso: Junio 2024].
- [20] «Pixel Electric,» [En línea]. Available: <https://www.pixelelectric.com/drones-parts/drone-assembly-parts/frames/pcb-s500-quadcopter-frame/>. [Último acceso: Abril 2024].
- [21] «SunnySky USA,» [En línea]. Available: <https://sunnyskyusa.com/>. [Último acceso: Abril 2024].
- [22] «SUNNYSKY X2814 1000KV,» RCDrone, [En línea]. Available: <https://rcdrone.top/es/products/sunnysky-x2814-iii-x2820-iii-i?variant=44011586879712>. [Último acceso: Abril 2024].
- [23] I. Penkov y D. Aleksandrov, «Analysis and study of the influence of the geometrical parameters of mini unmanned quad-rotor helicopters to optimise energy saving,» *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 14, nº 4, pp. 4730-4746, 2017.
- [24] «VIKEP 1pc PROPELER Electric Electric SOPTS Baja Ajuste para RC Modelo 11 \* 5.5,» Amazon, [En línea]. Available: <https://www.amazon.es/VIKEP-PROPELER-Electric-Ajuste-Modelo/dp/B09F6HMK1L>. [Último acceso: Abril 2024].
- [25] «Drfeify RC Brushless ESC, 40A Brushless ESC Speed Controller 5V / 3A,» Amazon, [En línea]. Available: [https://www.amazon.es/Drfeify-Brushless-Controller-Airplanes-Accesorio/dp/B08T61GQQB/ref=sr\\_1\\_3\\_sspa?dib=eyJ2IjoiMSJ9.-LyMvNXeSDp\\_TzzsoEBu81eJZ\\_usofvChTgywHFZpYl\\_1cQ91hgy0G9LTwdwTtIQWBSFyfAxEkay8majrnk2mJBVAKCkYMy2XFX5EVIQzpup9JuTzHH--7ukS73efLpD1kCuPSy-U](https://www.amazon.es/Drfeify-Brushless-Controller-Airplanes-Accesorio/dp/B08T61GQQB/ref=sr_1_3_sspa?dib=eyJ2IjoiMSJ9.-LyMvNXeSDp_TzzsoEBu81eJZ_usofvChTgywHFZpYl_1cQ91hgy0G9LTwdwTtIQWBSFyfAxEkay8majrnk2mJBVAKCkYMy2XFX5EVIQzpup9JuTzHH--7ukS73efLpD1kCuPSy-U). [Último acceso: Abril 2024].
- [26] «Batería LiPo de 11,1 V 8000mAh 3S 40C,» Banggood, [En línea]. Available: [https://m.banggood.com/es/ZOP-Power-11\\_1V-8000mAh-3S-40C-Lipo-Battery-TRX-Plug-With-Battery-Alarm-For-Traxxas-p-1104048.html?utm\\_source=googleshopping&utm\\_source=googleshopping&utm\\_medium=cpc\\_or\\_ganic&utm\\_medium=cpc\\_es&gmcCountry=ES&utm\\_content=minha&utm\\_content=ellen&utm\\_campaign=aceng-pmax-es-es-mb&utm\\_campaign=aceng-pmax-es-brad-type-240223-ellen&currency=EUR&cur\\_warehouse=CN&createTmp=1&ad\\_id=&gad\\_source=1&gbraid=0AAAADshcaWtcwwdKT2PmqB9QMIEw7B9Z&gclid=Cj0KCQjwv700BhDwARIsAC0sjWPEM-](https://m.banggood.com/es/ZOP-Power-11_1V-8000mAh-3S-40C-Lipo-Battery-TRX-Plug-With-Battery-Alarm-For-Traxxas-p-1104048.html?utm_source=googleshopping&utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_or_ganic&utm_medium=cpc_es&gmcCountry=ES&utm_content=minha&utm_content=ellen&utm_campaign=aceng-pmax-es-es-mb&utm_campaign=aceng-pmax-es-brad-type-240223-ellen&currency=EUR&cur_warehouse=CN&createTmp=1&ad_id=&gad_source=1&gbraid=0AAAADshcaWtcwwdKT2PmqB9QMIEw7B9Z&gclid=Cj0KCQjwv700BhDwARIsAC0sjWPEM-)

- LfCNcEZi09h8kwzXq\_9oTv62XWzEbjByxmmLp9MClq3NcufWEaAng4EALw\_wcB. [Último acceso: Abril 2024].
- [27] «Useful Overview of Lipo Battery Voltage,» UFine Battery, 26 Abril 2024. [En línea]. Available: <https://www.ufinebattery.com/blog/useful-overview-of-lipo-battery-voltage/>. [Último acceso: Abril 2024].
- [28] «Pixhawk 2.4.8,» RC Innovations, [En línea]. Available: <https://rc-innovations.es/shop/autopiloto-pixhawk-2-4-8-px4-32-bits-aviones-uav-drones-RPAs#attr=5568>. [Último acceso: Abril 2024].
- [29] «Holybro Módulo Telemetría SiK V3 915Mhz 100mW,» RC Innovations, [En línea]. Available: <https://rc-innovations.es/shop/modulo-telemetria-915mhz-100mw-sik-v3-holybro-pixhawk-px4>. [Último acceso: Abril 2024].
- [30] «Generic VMCR10978 : ODAY NEO-M8N Flight Controller GPS Module with Compass PX4,» Amazon, [En línea]. Available: <https://www.amazon.in/Generic-VMCR10978-NEO-M8N-Controller-Compass/dp/B06ZYLR7MZ>. [Último acceso: Abril 2024].
- [31] «FlySky FS-i6X 10ch + RX ia6b,» FlySky, [En línea]. Available: <https://www.flysky-cn.com/ia6b-canshu>.
- [32] «Cómo volar un dron: guía práctica para principiantes,» El Vuelo del Dron, 4 Julio 2016. [En línea]. Available: <https://elvuelodeldrone.com/blog-de-drones/como-volar-un-drone/>. [Último acceso: Abril 2024].
- [33] P. McKay, *First Person View - Fotografía*.
- [34] «ArduPilot Documentation,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/ardupilot/index.html>. [Último acceso: Enero 2024].
- [35] «PX4 Autopilot User Guide,» [En línea]. Available: <https://docs.px4.io/main/en/>. [Último acceso: Diciembre 2023].
- [36] P. Polivanov y A. Sidorenko, «Aerodynamic characteristics of a quadcopter with propellers,» *AIP Conference Proceedings*, 2021.
- [37] D. Rivas, *Apuntes de Mecánica del Vuelo*, Departamento de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Aeroespacial, 2023.
- [38] «80% thrust at max throttle,» [En línea]. Available: <https://discuss.ardupilot.org/t/60-thrust-at-max-throttle/20788/7>. [Último acceso: Diciembre 2023].
- [39] «Maximum climb altitude of a drone,» [En línea]. Available: <https://www.technikconsulting.eu/en/analysis/drone.html>. [Último acceso: Diciembre 2023].
- [40] A. Franco, *Apuntes de Fundamentos de Propulsión*, Departamento de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Aeroespacial, 2023.



# ANEXO I. CÓDIGOS MATLAB

---

## Modelo de Atmósfera Estándar Internacional (modelo ISA):

```
close all;
clear all;
clc;

alpha_T = 6.5e-3; % Gradiente térmico [K/m]
theta_sl = 288.15; % Temperatura del aire a nivel del mar [K]
pres_sl = 1.01325e5; % Presión del aire a nivel del mar [N/m2=Pa]
rho_sl = 1.225; % Densidad del aire a nivel del mar [kg/m^3]
g = 9.80665; % Aceleración de la gravedad [m/s^2]
R = 287.05; % Constante del aire [J/kgK]

% Ecuaciones de la temperatura del aire, la presión del aire y la
densidad del aire en función de la altitud en la troposfera

h = 0:1000:11000; % Altitudes desde nivel del mar (h = 0 m) hasta la
tropopausa (h = 11000 m )
theta = theta_sl-alpha_T.*h;
pres = pres_sl.*(1-alpha_T.*h./theta_sl).^(g./R./alpha_T);
rho = rho_sl.*(1-alpha_T.*h./theta_sl).^(g./R./alpha_T-1);

figure;
plot(h,theta)
xlabel('Altitud [m]');
ylabel('Temperatura del aire [K]');

figure;
plot(h,pres)
xlabel('Altitud [m]');
ylabel('Presión del aire [Pa]');

figure;
plot(h,rho)
xlabel('Altitud [m]');
ylabel('Densidad del aire [kg/m3]');
```

## Velocidad máxima de ascenso del dron en función de la altitud

```

close all;
clear all;
clc;

% Datos de entrada

global W S b n_max CD alpha alpha_max kT rho_sl rho g

W = 23.20 + (0.400*9.80665); % Peso del dron [N]; W = Wdron +
    Wsistema_misión
n_max = 0.8*993.58; % Velocidad máxima de giro de las hélices [rad/s]
T_max = 4*9.81; % Empuje máximo del dron [N]
b = 500e-3; % Diagonal de la carcasa del dron [m]
S = 1/2*pi*(b/2)^2; % Superficie aproximada del dron [m^2]
CD = 0.4; % Coeficiente de resistencia del dron
rho_sl = 1.225; % Densidad del aire a nivel del mar [kg/m^3]
kT = T_max/rho_sl/n_max^2/b^4; % Constante del empuje máximo

%Modelo ISA:

alpha_T = 6.5e-3; % Gradiente térmico [K/m]
theta_sl = 288.15; % Temperatura del aire a nivel del mar [K]
g = 9.80665; % Aceleración de la gravedad [m/s^2]
R = 287.05; % Constante del aire [J/kgK]

rho = @(h) rho_sl.*(1-alpha_T.*h./theta_sl).^-(g./R./alpha_T-1);

h = 0:400:20400;

T_max_h = kT.*rho(h).*n_max.^2.*b^4; % Empuje máximo a cada altitud

T_max_h_fun = @(h) kT.*rho(h).*n_max.^2.*b^4; % Empuje máximo a cada
    altitud

h_techo = fsolve(@(h)T_max_h_fun(h)-W, 5000);

plot(h, T_max_h, 'k');
hold on
yline(W, '--b');
xline(h_techo, '--r');
xlabel('Altitud de vuelo [m]')
ylabel('Empuje máximo [N]')

h = 0:20:h_techo;
T_max_h = kT.*rho(h).*n_max.^2.*b^4;

figure

V_maxsub = sqrt((T_max_h-W).*2./rho(h)./S./CD); % Velocidad máxima de
    ascenso a cada altitud [m/s]

plot(h, V_maxsub);
xlabel('Altitud de vuelo [m]')
ylabel('Velocidad máxima de ascenso [m/s]')

```

## Velocidad máxima de desplazamiento horizontal del dron en función de la altitud

```

close all;
clear all;
clc;

% Datos de entrada

global W S b n_max CD alpha alpha_max kT rho_sl rho g

W = 23.20 + (0.400*9.80665); % Peso del dron [N]; W = Wdron +
    Wsistema_misión
n_max = 0.8*993.58; % Velocidad máxima de giro de las hélices [rad/s]
T_max = 4*9.81; % Empuje máximo del dron [N]
b = 500e-3; % Diagonal de la carcasa del dron [m]
S = 1/2*pi*(b/2)^2; % Superficie aproximada del dron [m^2]
CD = 0.4; % Coeficiente de resistencia del dron
rho_sl = 1.225; % Densidad del aire a nivel del mar [kg/m^3]
kT = T_max/rho_sl/n_max^2/b^4; % Constante del empuje máximo

%Modelo ISA:

alpha_T = 6.5e-3; % Gradiente térmico [K/m]
theta_sl = 288.15; % Temperatura del aire a nivel del mar [K]
g = 9.80665; % Aceleración de la gravedad [m/s^2]
R = 287.05; % Constante del aire [J/kgK]

rho = @(h) rho_sl.*(1-alpha_T.*h./theta_sl).^(g./R./alpha_T-1);

T_min = W; % Empuje mínimo necesario para que el dron vuele [N]
alpha = 0:0.01:80;
T = W ./cos(alpha.*pi./180); % Empuje necesario para no descender [N]

h = 0:100:20400;
T_max_h_fun = @(h) kT.*rho(h).*n_max.^2.*b^4; % Empuje máximo a cada
    altitud
h_techo = fsolve(@(h)T_max_h_fun(h)-W, 5000);

figure;
plot(alpha,T,'k')
yline(T_min, '--r');
hold on

for h = 0:1000:h_techo
T_max_h = kT.*rho(h).*n_max.^2.*b^4;
yline(T_max_h, '--b');
xlabel('Ángulo de balanceo [°]')
ylabel('Empuje [N]')

T = @(alpha) W./cos(alpha.*pi./180);

```

```

eqn = @(alpha) T(alpha)-T_max_h;
alpha_max = fzero(eqn, 30); % Ángulo de balanceo máximo para cada
    altitud [°]

xline(alpha_max, '--m');
end

figure

i=1;
hs = 0:500:h_techo;

for h = 0:500:h_techo
T = @(alpha) W./cos(alpha.*pi./180);
T_max_h = kT.*rho(h).*n_max.^2.*b^4;
eqn = @(alpha) T(alpha)-T_max_h;
alpha_max = fzero(eqn, 30);
alphas_max(i) = alpha_max;
end

plot(hs, alphas_max)
hold on
xlabel('Altitud de vuelo [m]')
ylabel('Ángulo de balanceo máximo [°]')

figure

i=0;

for h = 0:500:h_techo
i=i+1;
T = @(alpha) W./cos(alpha.*pi./180);
T_max_h = kT.*rho(h).*n_max.^2.*b^4;
eqn = @(alpha) T(alpha)-T_max_h;
alpha_max = fzero(eqn, 30);
V_maxhor(i) = sqrt(2.*T_max_h.*sin(alpha_max.*pi./180)./rho_sl./S./
CD); % Velocidad máxima de desplazamiento horizontal a cada altitud
    [m/s]
hs(i)=h;
end

plot(hs, V_maxhor, 'b')
hold on
xlabel ('Altitud de vuelo [m]')
ylabel ('Velocidad máxima de desplazamiento horizontal [m/s]')

```



## Techo teórico de vuelo del dron

```

close all;
clear all;
clc;

% Datos de entrada

global W S b n_max CD alpha alpha_max kT rho_sl rho g

W = 23.20 + (0.400*9.80665); % Peso del dron [N]; W = Wdron +
  Wsistema_misión
n_max = 0.8*993.58; % Velocidad máxima de giro de las hélices [rad/s]
T_max = 4*9.81; % Empuje máximo del dron [N]
b = 500e-3; % Diagonal de la carcasa del dron [m]
S = 1/2*pi*(b/2)^2; % Superficie aproximada del dron [m^2]
CD = 0.4; % Coeficiente de resistencia del dron
rho_sl = 1.225; % Densidad del aire a nivel del mar [kg/m^3]
kT = T_max/rho_sl/n_max^2/b^4; % Constante del empuje máximo

%Modelo ISA:

alpha_T = 6.5e-3; % Gradiente térmico [K/m]
theta_sl = 288.15; % Temperatura del aire a nivel del mar [K]
g = 9.80665; % Aceleración de la gravedad [m/s^2]
R = 287.05; % Constante del aire [J/kgK]

rho = @(h) rho_sl.*(1-alpha_T.*h./theta_sl).^(g./R./alpha_T-1);

rho_min = W/n_max^2/kT/b^4; % Densidad del aire cuando T=W [kg/m^3]
eqn = @(h) rho(h)-rho_min;
h_max_teo = fzero(eqn, 5000)/1000 % [km] Altitud máxima teórica

```

## Alcance del dron

```

close all;
clear all;
clc;

% Datos de entrada %

global W S b n_max CD alpha alpha_max kT rho_sl rho g

W = 23.20 + (0.400*9.80665); % Peso del dron [N]; W = Wdron +
    Wsistema_misión
n_max = 0.8*993.58; % Velocidad máxima de giro de las hélices [rad/s]
T_max = 4*9.81; % Empuje máximo del dron [N]
b = 500e-3; % Diagonal de la carcasa del dron [m]
S = 1/2*pi*(b/2)^2; % Superficie aproximada del dron [m^2]
CD = 0.4; % Coeficiente de resistencia del dron
rho_sl = 1.225; % Densidad del aire a nivel del mar [kg/m^3]
kT = T_max/rho_sl/n_max^2/b^4; % Constante del empuje máximo

%Modelo ISA:

alpha_T = 6.5e-3; % Gradiente térmico [K/m]
theta_sl = 288.15; % Temperatura del aire a nivel del mar [K]
g = 9.80665; % Aceleración de la gravedad [m/s^2]
R = 287.05; % Constante del aire [J/kgK]

rho = @(h) rho_sl.*(1-alpha_T.*h./theta_sl).^((g./R./alpha_T)-1);

% Consumo

% Datos de la batería del dron
Ah = 8; % Amperios hora
V = 11.1; % Voltios
Wh = V*Ah; % Vatios hora

consumo_data = @(T_data) 0.1669.*(T_data.^2)+9.356.*T_data+0.6202;

h_max = 3650;

dh = 0.01;

hs = 0:dh:h_max;

empuje_h = @(h) kT.*rho(h).*(1*n_max).^2.*b^4;
V_sub_h = @(h) sqrt((empuje_h(h)-W).*2./rho(h)./S./CD);

energia=0;
tiempos = 0;

for i=1:length(hs)

```

```

energia = energia + consumo_data(empuje_h(hs(i)))/V_sub_h(hs(i))*dh;
tiempos = tiempos+dh/V_sub_h(hs(i)); %% s
t(i) = tiempos;

end

energia = energia/3600; %% Wh
tiempos = tiempos/60; %% min

h=0;
figure(1)
hold on
figure(2)
hold on

hs = linspace(0, h_max, 10);

for j=1:length(hs)
h = hs(j);

T = @(alpha) W./cos(alpha.*pi./180);
T_max_h = kT.*rho(h).*n_max.^2.*b^4;
eqn = @(alpha) T(alpha)-T_max_h;
alpha_max = fzero(eqn, 30);

alpha = linspace(0,alpha_max,400);

for i=1:length(alpha)

    V_hor(i) = sqrt(2.*T(alpha(i)).*sin(alpha(i).*pi./180)./rho(h)./
S./CD);
    t_autonomia(i) = Wh/consumo_data(T(alpha(i)))*60;
    d_autonomia(i) = V_hor(i)*t_autonomia(i)*60/2;

end
figure(1)
plot(alpha, d_autonomia)
xlabel('Ángulo de balanceo [°]');
ylabel('Alcance [m]');

figure(2)
plot(alpha, V_hor)
xlabel('Ángulo de balanceo [°]');
ylabel('Velocidad de desplazamiento horizontal [m/s]');

display(['h =' num2str(h)])
display(max(d_autonomia))

[imax jj] = max(d_autonomia);
display(alpha(jj));
display(t_autonomia(jj));
display(V_hor(jj));
end

figure(1);

```

```
legend(string("h = " + string(hs)))
```

```
figure(2);
```

```
legend(string("h = " + string(hs)))
```

