

# ROBOTS VOLADORES. DRONES



**Autores:** Israel Alcañiz Felipe, Eros Piera  
Moreno y Jaume Díaz Beltrán

## Índice:

1. **INTRODUCCIÓN A LOS ROBOTS VOLADORES**
2. **ESTADO DEL ARTE**
  - 2.1. Historia y evolución de los drones
  - 2.2. Clasificación
    - 2.2.1. *Tipos de drones en función de su uso*
    - 2.2.2. *Tipos de drones según su método de control*
    - 2.2.3. *Drones según el tipo de ala*
  - 2.3. Tipos de drones multirrotor
3. **HARDWARE Y COMPONENTES BÁSICOS**
4. **CONTROL DE UN DRON (CUADRICÓPTERO)**
  - 4.1. Análisis cinemático
  - 4.2. Aerodinámica
  - 4.3. Modelo dinámico
  - 4.4. Algoritmos de control
5. **EJEMPLO DE MAPEO CON UN CUADRIROTOR**
  - 5.1. Instalación de paquetes
  - 5.2. Proceso
  - 5.3. Construcción del mapa
  - 5.4. Ejemplo de mapeo
  - 5.5. Conclusión sobre el control de un dron

## 1. INTRODUCCIÓN A LOS ROBOTS VOLADORES

Un dron, tal y como lo conocemos hoy en día, es un vehículo aéreo sin tripulación, reutilizable, que es capaz de mantener un nivel de vuelo controlado, sostenido y propulsado mediante motores de propulsión.

El término dron proviene del vocablo inglés drone (zángano, zumbido de estos insectos) y es el que sustituye coloquialmente a las iniciales UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o VANTs en España (vehículo aéreo no tripulado), aunque esto no es del todo correcto. Hay distintos términos asociados a robots voladores:

- **UAV (Unmanned Aerial Vehicle):** este término hace referencia a cualquier dispositivo que pueda volar sin tripulación, incluyendo a cualquier juguete radiocontrol.
- **UAS (Unmanned Aerial System):** es el conjunto de componentes en sí, más allá del sistema de vuelo.
- **Dron:** es un sinónimo parcial de UAS, ya que un dron es un UAS que se usa para una función en específico. Por ejemplo, un UAS pasa a ser un dron cuando se le añade una cámara para una tarea de vigilancia.
- **RPA (Remotely Piloted Aircraft):** se corresponde a un sistema de vuelo que es controlado de manera remota por una persona física. Al igual que los UAVs, los sistemas más complejos tienen una nomenclatura específica, conocidos como RPAS.
- **Multicópteros:** aeronaves con múltiples rotores capaces de despegar de manera vertical.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LOS DRONES

Los datos más antiguos que se tienen sobre el uso de plataformas aéreas no tripuladas datan del año 1849 cuando, durante una sublevación en Venecia, el Imperio austríaco bombardeó ésta empleando globos aerostáticos manejados por cuerdas.

Aunque los globos no concuerdan con la definición actual de dron, el concepto sí se ajusta al de plataforma no tripulada que porta una carga útil.

#### - Los primeros drones militares

A partir de aquí, hay que avanzar hasta la segunda mitad de la Primera Guerra Mundial (1916) para observar un desarrollo más evidente de los UAV.

El desarrollo de estos drones fue de la mano de los misiles, teniendo como objetivo

encontrar una forma de guiar los explosivos hacia un objetivo mediante el seguimiento de éste, siendo una versión temprana de los misiles de crucero actuales.

Como ejemplo tenemos el “Kettering Bug” estadounidense fabricado a partir del “Automatic Airplane”.

Tras la Primera Guerra Mundial, muchos aviones biplanos se empezaron a convertir en drones, en general pilotados mediante radiocontrol. Esto provocó que las grandes potencias de Occidente



**Figura 1: Kettering Bug**

comenzaran a desarrollar aviones señuelo, que hacían de blanco, años antes del inicio de la Segunda Guerra Mundial.

Durante la Segunda Guerra Mundial, los militares alemanes crearon el FX-1400, el primer arma de control remoto que realmente fue operativo. Fue el primer avión no tripulado militar desplegado correctamente, además de ser el antecesor de los modernos misiles antibuque y otras armas guiadas de precisión.

#### **- Década de los 60**

Los avances en la electrónica y la tecnología de transistores hizo posible que, por primera vez, los componentes controlados por radio disminuyesen mucho su tamaño y pudiesen estar disponibles para los clientes. Esto creó una popularidad masiva en los aviones RC de los EE.UU, que ofrecían tanto modelos capacitados para vuelo interior como modelos al aire libre más grandes; y con ello se originó una industria artesanal similar a la que sucedió medio siglo después.

## - **Inicio del Siglo XXI (2001-2010)**

Tras el atentado del 11-S, la CIA comenzó a sobrevolar Afganistán con drones armados como parte de su guerra contra los talibanes.

La primera operación que llevaron a cabo tuvo lugar en febrero de 2002, cuando se usó un dron Predator no tripulado para apuntar a un sospechoso que creían que era Osama Bin Laden; sin embargo, resultó ser un ciudadano inocente. Sucesos como éste crearon una gran polémica y pusieron en duda el uso de drones en la guerra.

No fue hasta 2006 cuando la FAA (Federal Aviation Administration) reconoció el potencial de los drones no militares para realizar tareas comerciales. Esto permitió que se eliminaran algunas limitaciones que habían impuestas sobre los drones que volaban con fines recreativos, y a su vez abrió un abanico de posibilidades para las empresas que querían introducir estos elementos en su industria.

Al principio apenas se requerían permisos comerciales de drones. Sin embargo, ese número pronto aumentó.



**Figura 2: Dron Predator**

## - **El dron AR**

En 2010, la compañía francesa Parrot lanzó su Parrot AR Drone, el primer dron listo para volar que se puede controlar completamente a través de Wi-Fi, usando un teléfono inteligente. El avión no tripulado tuvo un éxito casi inmediato, tanto comercialmente como en la crítica, recibiendo el premio CES Innovations 2010 y vendiendo más de medio millón de unidades. El AR Drone 2.0 de la compañía mejoró aún más la fórmula con un sistema de pilotaje más fácil.

## - **Amazon Prime Air**

En diciembre de 2013, Amazon lanzó un video conceptual que mostraba el sueño de su fundador Jeff Bezos de un sistema de entrega basado en drones. Aunque no fue la primera compañía en considerar las entregas con drones, fue la que puso dicha

tecnología en la conciencia pública. Aunque Amazon después aclaró que las entregas aéreas requerirán algunos cambios en las reglas federales.

#### - **La debacle del dron Lily**

Nos situamos en 2015. La industria de los drones de consumo ha ido viento en popa. Sin embargo, no todo ha sido bueno. Tal vez la mayor desilusión fue el desastre del dron Lily Camera.

A pesar de acumular \$34 millones en pedidos anticipados, la compañía original detrás de esta cámara inteligente de vuelo terminó por declararse en bancarrota y apagarse después de una serie de retrasos.

#### - **Drones más inteligentes**

El mayor avance en los últimos años viene de la mano de DJI con el Phantom 4, con la introducción de la visión inteligente y la tecnología relacionada con el aprendizaje automático. Esto permite evitar obstáculos, rastrear y fotografiar de forma inteligente personas, animales u objetos, en lugar de limitarse a seguir una señal de GPS. Fue un hito importante para la fotografía con drones y los drones de consumo en general.

## **2.2. CLASIFICACIÓN**

Los drones se pueden clasificar atendiendo a tres criterios: según su uso, método de control y tipo de ala.

### **2.2.1. *Tipos de drones en función de su uso***

La primera clasificación que se puede hacer es en función de su utilidad. En este sentido, como ya se ha podido observar en el apartado anterior, sus primeros usos fueron en aplicaciones militares, pero con el paso del tiempo se ha ido extendiendo el uso de drones con un fin comercial y civil. Por lo tanto, se puede diferenciar entre estos dos grupos: drones de uso militar y de uso civil:

Dentro del uso civil se puede encontrar desde juguetes hasta aquellos que son empleados para un fin comercial, medida de terrenos, exploración de espacios de difícil acceso, realización de reportajes fotográficos y vídeo, etc. Por lo tanto, la finalidad que se le dé al dron marcará las características de éste.

Por ejemplo, los drones de uso infantil están diseñados para el vuelo en interiores, son de fácil manejo y cuentan con un precio bastante asequible.

Para adultos o aquellos con más experiencia e interés ya se daría el salto a los drones de uso amateur, los cuales tienen un precio más elevado debido a que

están equipados con muchos más sensores, motores más potentes, mejor calidad de materiales y ofrecen otro tipo de prestaciones. En estos drones ya es necesario informarse sobre si necesitan alguna licencia.

Por último, estarían aquellos que tiene un uso profesional. Este tipo de dron ofrece un mayor rango de vuelo y suelen estar equipados con todo tipo de sistemas que favorezcan un vuelo más seguro en exteriores, como sistemas de posicionamiento en tiempo real mediante localización por GPS

En cuanto al uso militar, como se ha mencionado anteriormente, los primeros drones se desarrollaron para este uso y hoy en día siguen siendo muy comunes en algunas tareas de este ámbito. Concretamente, en este entorno son conocidos comúnmente comoUCAV (Unmanned Combat Air Vehicle).

Aunque se nombre indique como propósito el combate, la realidad es que también son usados en otros fines muy distintos, como el abastecimiento de provisiones en zonas de difícil acceso, búsqueda de desaparecidos, localización de vidas humanas entre los escombros después de alguna catástrofe, etc.

### ***2.2.2. Tipos de drones según su método de control***

- **Autónomo:** el dron no necesita ningún tipo de asistencia desde la tierra, funciona de manera autónoma en base a sus propios sistemas y sensores integrados. Están equipados con sistemas que permiten planificar su ruta y que el vuelo esté completamente programado. Además, suelen contar también con sistemas de localización GPS para tenerlos localizados en tiempo real.
- **Monitorizado:** en este tipo de control sí se necesita de un técnico que proporcione información al dron y controle las reacciones y respuestas que manifiesta el dron respecto a las indicaciones proporcionadas por el técnico.
- **Supervisado:** se encuentran a medio camino entre los drones autónomos y los RC. El operador pilota directamente el dron, aunque puede realizar ciertas tareas de forma automática bajo la supervisión del piloto.
- **Preprogramado:** El dron sigue un plan de vuelo diseñado previamente y no tiene medios para cambiarlo para adaptarse a posibles cambios.
- **Control remoto:** También conocidos como drones de radiocontrol, son los más implantados dentro del uso civil. La aeronave es pilotada directamente por un técnico mediante una emisora de radiofrecuencia.

### **2.2.3 Drones según el tipo de ala**

Para esta clasificación, se puede distinguir entre dos tipos de drones: de ala fija y de alas rotatorias.

Los drones de ala fija son aquellos que son capaces de aprovechar el aire y generar fuerzas que les permite mantenerse en el aire aprovechando su aerodinámica.

Los drones de ala fija tienen una forma aerodinámica como la de un avión convencional. Esta forma les permite generar sustentación y mantenerse en el aire durante horas, lo que los hace ideales para tareas en las que se cubren grandes distancias y les permite alcanzar grandes velocidades.

Pero este diseño le impide realizar vuelo estacionario (permanecer quieto en un punto), lo cual no le permite realizar tareas en las que se necesite una imagen fija. La propulsión de estos para iniciar el vuelo se suele hacer de manera manual y el mantenimiento en el aire mediante una batería, aunque los drones de este tipo destinados al ámbito militar cambian esta forma de propulsión por un motor de combustión o turbinas.

Los drones multirrotor son el tipo de dron más extendido y utilizado tanto a nivel de ocio como profesional. Son conocidos también como multirrotores y se pueden clasificar a su vez en función del número de rotores que utilicen.

Estos multirrotores ofrecen una gran versatilidad, puesto que permiten instalar todo tipo de cámaras para realizar diferentes tareas. Son drones que despegan y aterrizan de forma vertical y prácticamente desde cualquier superficie, eso sí, al contrario que los drones de ala fija su gran inconveniente suele estar relacionado con la autonomía de vuelo que ofrecen.

Por lo tanto, si el multicóptero está destinado a realizar ciertas tareas que lleven mucho tiempo, se deberá disponer de varias baterías para ir las sustituyendo, lo que también supone un coste adicional.

### **2.3. TIPOS DE DRONES MULTIRROTOR**

Este tipo de drones son los más conocidos, extendidos y utilizados tanto a nivel de ocio como profesional. Se utilizan para hacer fotogrametría, fotografía y modelos 3D. Los drones multirrotores permiten una imagen fija y estable gracias a sus motores, que pueden ser 4-6 o más y que le permiten mantener un vuelo estacionario.

Estos UAS se componen de un cuerpo central y múltiples rotores que impulsan las hélices para volar y maniobrar, su nombre va de acuerdo con su número de hélices.

Cuando ya están en el aire, los RPAS usan propelas fijas para controlar el movimiento de vuelo para cambiar la velocidad relativa en la que se desplaza cada uno de los motores, variando el empuje y el torque producido por cada motor.

Las ventajas de los drones multirrotor son: pueden acceder a zonas inaccesibles para otros tipos de drones, despegue y aterrizaje vertical y sencillo, se puede mantener con vuelo suspendido (vuelo estacionario), precios más bajos, son más económicos...



El uso de estos tipos de dron ha resultado un gran avance en todos los sectores en los que se necesite una cámara e imagen de forma prolongada (vigilancia, cine, etc).

Las desventajas de los drones multirrotor son: vuelo limitado (cómo hemos explicado anteriormente), ruidosos, no son aerodinámicos y mucha dificultad para volar con lluvia o vientos fuertes.

Los drones de ala rotatoria se pueden clasificar en:

- **Tricópteros (3 motores):** Desde el punto de vista tecnológico es la versión menos complicada. Sus funciones son simples y se utiliza principalmente para volar solo con lo que atrae a los aficionados y niños más pequeños. Son fáciles de construir y reparar, son baratos y tienen un chasis mucho más simple que otro tipo de drones. El problema es que normalmente se componen de materiales de no mucha calidad, tienen una vida útil corta, y tienen un mayor riesgo de daños debido a, entre otros aspectos, que no puede seguir funcionando si uno de sus rotores falla.
- **Cuadricópteros (4 motores):** Levantado y propulsado por cuatro rotores. Son muy flexibles en cuanto a la calidad del material y su uso en diferentes escenarios, muy maniobrables, capacidad de movimiento en cualquier dirección y buena estabilidad. Su principal defecto es la falta de potencia frente a otros drones con un mayor número de rotores.
- **Hexacópteros (6 motores):** los rotores están dispuestos en forma circular por encima del cuerpo principal del hexacóptero. A menudo llevan una cámara y tiene dos patas en forma de esquí, que le permiten una gran estabilidad durante el aterrizaje. Son drones muy estables y flexibles, con capacidad para continuar el vuelo si un rotor falla, aunque son más caros.
- **Octacópteros (8 motores):** tiene 8 hélices funcionando a la misma vez, lo que le permite tener una capacidad de vuelo mucho mejor que todos los drones anteriores mencionados. Combina la velocidad de vuelo, la maniobrabilidad y la potencia de elevación de los grupos anteriores. Son capaces de grabar imágenes estables y de alta calidad desde cualquier altitud.

Las ventajas de este tipo de drones es que son muy rápidos y potentes, lo que les permite volar en condiciones adversas, transportar cargas útiles pesadas o mantener el vuelo habiendo perdido varios motores. Sus inconvenientes es que tienen un gran tamaño, son más caros y debido a sus dimensiones consumen mucha energía, traducándose en un menor tiempo de vuelo y que precisen de carga frecuente y baterías adicionales.

### **3. HARDWARE**

#### **- Motores**

En general los multirrotores emplean motores eléctricos conocidos como brushless (sin escobillas). Estos motores tienen una alimentación en C.C. y no poseen escobillas para cambiar la polaridad de sus bobinados. Están compuestos por una parte móvil llamada rotor donde se localizan una serie de imanes permanentes, y una parte fija denominada estator donde se sitúan los bobinados de hilo conductor.

La corriente eléctrica del sistema de alimentación pasa por los bobinados, dotándolos de una polaridad variable que, al interactuar con el campo magnético producido por los imanes permanentes, producirá el giro del rotor.

Hay un parámetro importante que debemos considerar, que es el factor "kV". Normalmente aparece junto al número de vueltas de bobinado del motor, e indica el número de revoluciones por minuto a las que es capaz de girar el motor por cada voltio aplicado.

Estos motores no tienen escobillas, ni colector ni delgas; por lo que ahora el elemento que controlará que el rotor gire sea cual sea su posición será el variador electrónico.

#### **- Variadores**

El variador o ESC (Electronic Speed Controller) es un circuito electrónico que controla la velocidad y el sentido de giro de los motores y que puede servir de freno dinámico para éstos.

Está compuesto por un circuito integrado que hace de puente entre el controlador del dron y los motores. El variador se conecta al controlador de vuelo mediante tres cables, dos de alimentación y uno que transmite la señal de control al variador.

El principal problema en el conjunto brushless-variador es la sincronización entre ambos, el variador debe enviar la señal de control al motor en el momento adecuado para activar cada uno de los bobinados y que el motor gire de manera correcta.

#### **- Hélices**

Las hélices son uno de los componentes más importantes del dron, ya que de ellas depende la fuerza de empuje de cada uno de los propulsores; para un mismo motor la eficiencia varía en función de las características de la hélice que se le asocie.

Las hélices están caracterizadas por dos parámetros que indican su comportamiento de vuelo: la longitud o distancia entre puntas, y el paso de la hélice. Un tamaño de hélice mayor genera un mayor empuje y poder soportar mayor carga. El paso de la hélice indica

la distancia teórica que la hélice avanzará a lo largo del eje de rotación en un giro completo, por lo tanto es la capacidad de la hélice para desplazar el aire y generar empuje.

#### - **Baterías**

La batería de iones de litio, también denominada batería Li-Ion o LIPO, es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica, que emplea como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.

Las baterías LiPo son ligeras en comparación con sus competidoras y pueden fabricarse en una gran variedad de tamaños y formas. Presentan una gran capacidad de almacenamiento de carga y nos ofrecen un alto nivel de densidad energética, es decir, la relación entre la cantidad de energía acumulada por unidad de volumen.

Este tipo de batería presenta una alta tasa de descarga energética, lo cual es requerido por los motores eléctricos de los vehículos aéreos no tripulados. Las baterías se componen de una serie de celdas que son proporcionales a la cantidad de carga que puede almacenar la batería y a su duración en la fase de descarga.

#### - **Chasis**

Esqueleto del dron, en él van a ir implantados el resto de los componentes. Es la estructura central, la que determina el tamaño y el resto de las características. Para reducir el peso y aumentar la resistencia se utilizan los materiales compuestos como la fibra de carbono.

#### - **Placa controladora de vuelo**

Equivalente al cerebro de nuestro dron, es el ordenador integrado que recoge datos del sistema del dron, GPS, velocidades, información de giroscopios y acelerómetros y ordena los movimientos al dron, recibiendo las órdenes que enviamos desde el suelo con el control remoto o mando. A ella van conectados los sensores:

**Giroscopio:** mide los grados de alabeo y cabeceo respecto al horizonte.

**Sensores de altitud y altura:** la altura de vuelo es la distancia al suelo y la altitud la distancia hasta el nivel del mar.

**Sensores de variación de altura:** con él se obtienen las medidas de ascenso y descenso del dron al cambiar su altura de vuelo mediante variaciones de presión.

**Brújula:** sensor de rumbo, mide la dirección del campo magnético de la Tierra para conocer la orientación del dron con respecto al norte magnético.

**Sensor de velocidad:** mide la presión que ejerce el aire contra la pared frontal del dron al desplazarse y con ese dato deduce la velocidad del dron.

**Sensores de posición:** GPS, que recibe vía satélite para obtener la posición del aparato en un mapa en tiempo real, además de registrar la posición de despegue y sistema inercial. Con estos sensores podemos obtener también información sobre la altura y altitud.

- **Estación de control**

Consta de tres elementos:

**Emisor/receptor de señal:** envía al dron información para el control del vuelo y recibe datos de los sensores mediante señales de radio a través de una antena.

**Elementos de control o mandos:** nos permiten pilotar el aparato dándonos el control sobre los motores y el resto de los sistemas que influyen en el vuelo.

**Elementos de visualización y gestión de datos:** procesa los datos de posicionamiento y telemetría y nos muestra la información necesaria para el vuelo.

- **Gimbal o cardán**

Elemento estabilizador móvil que une la cámara al dron. La mantiene controlada y nivelada durante el vuelo, y hace que podamos controlar el giro en los ejes x,y,z de la cámara desde la estación de control.

- **Cámara**

Muchos drones la llevan incluida y otros permiten su instalación. Nos ofrecen la posibilidad de visualizar en primera persona lo que se vería desde el dron, además de la toma de imágenes y vídeo aéreo.

- **Tren de aterrizaje**

Es donde el dron se apoya al tomar tierra para evitar sufrir daños al llegar al suelo. Suelen adoptar formas de patas que en ocasiones integran antenas para recibir la señal del control remoto en su interior. Y luces LED que varían de color y frecuencia para que el piloto pueda conocer si existe algún tipo de problema en el estatus de la aeronave en pleno vuelo.

## 4. CONTROL DE UN DRON (CUADRICÓPTERO)

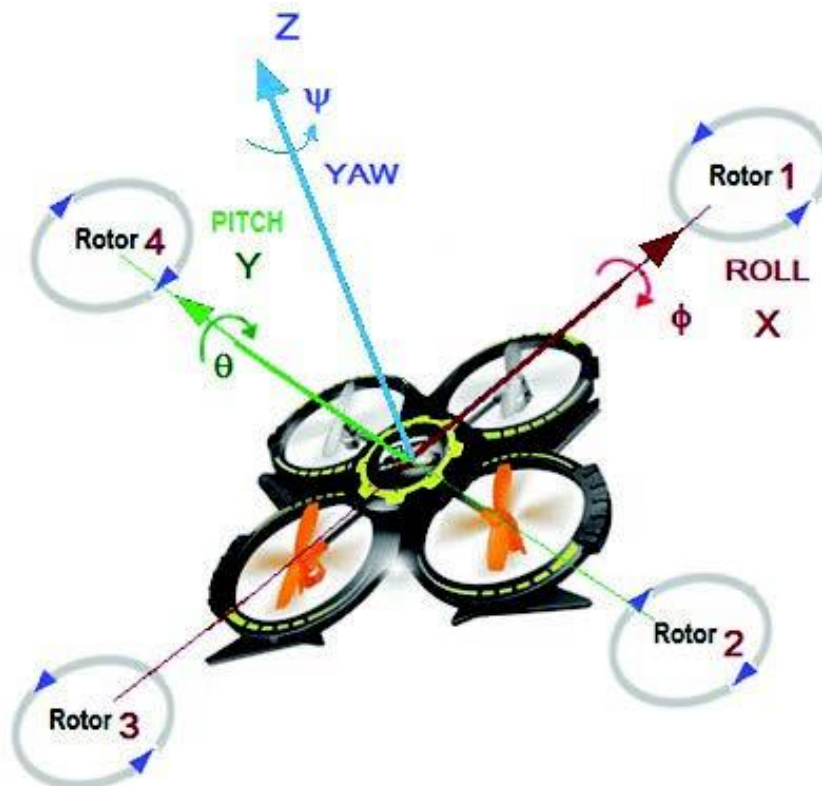
Para el control de un dron (en este caso un cuadricóptero) es necesario, en primer lugar, realizar distintos cálculos como el peso total del dron, la fuerza de empuje, el análisis de la cinemática, aerodinámica y dinámica del robot y, tras esto, elegir un algoritmo de control que se adapte a las características del robot y de la tarea a realizar.

Por ejemplo, para que el dron tenga una buena capacidad de maniobra y suficiente autonomía se estima que la fuerza de empuje debe ser entre dos y tres veces mayor al peso total del dron.

### 4.1. ANÁLISIS CINEMÁTICO

Un cuadricóptero tiene cuatro rotores: dos laterales (rotores 2 y 4), uno frontal (1) y otro posterior (3).

Este tipo de dron tiene 6 GDL: tres de traslación ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) y tres rotacionales (roll, pitch, yaw). Estos últimos se realizan con la combinación y variación de la velocidad y el sentido de giro de los motores.



- **Roll**

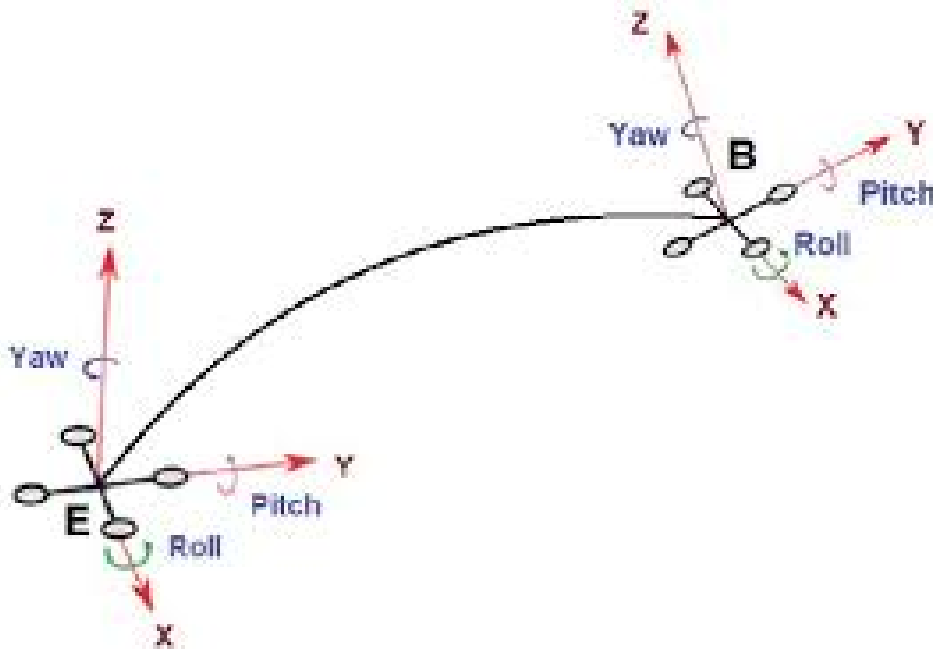
Rotación sobre el eje x. Se obtiene al modificar las velocidades de los rotores 2 y 4, manteniendo los dos rotores restantes invariantes en velocidad, al igual que el torque total. Se conoce como movimiento de alabeo, hacia la izquierda y derecha.

- **Pitch**

Rotación sobre el eje y. Se obtiene al modificar las velocidades de los rotores 1 y 3, manteniendo los dos rotores restantes invariantes en velocidad, al igual que el torque total. Este es el movimiento de cabeceo, hacia adelante y atrás.

- **Yaw**

Rotación sobre el eje z. La velocidad de los rotores 1 y 3 se aumenta, los rotores 2 y 4 se disminuyen para mover la orientación a la derecha, como se puede observar en la figura anterior. Esto produce un desbalance aerodinámico de los torques que permite que el cuadricóptero gire en su propio eje. Si todos los rotores mantienen la misma velocidad, el torque total será cero; y si además el empuje total de la aeronave es igual a su peso, esta se mantendrá en vuelo estacionario. Se conoce como movimiento de guiñada.



La posición del cuadricóptero en el sistema E está determinada por el vector  $[x \ y \ z]^T$ , y la orientación por el vector  $[\text{roll}, \text{pitch}, \text{yaw}]$ . Para la matriz de rotación se usa la convención  $[Z_{\text{yaw}}][Y_{\text{pitch}}][X_{\text{roll}}]$  como movimiento alrededor de los ejes.

Con estas matrices de rotación se realiza el cálculo de la matriz de rotación completa:

$$R(\phi, \theta, \psi) = R(z, \psi) \cdot R(y, \theta) \cdot R(x, \phi) =$$

$$\begin{bmatrix} c\theta c\psi & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - s\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

**Ecuación 1.1 Matriz de rotación**

Esta matriz se reduce al considerar pitch y roll muy pequeños, quedando:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_E \\ \dot{y}_E \\ \dot{z}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}$$

**Ecuación 1.2. Modelo cinemático simplificado de un cuadricóptero**

El vector  $[V_x \ V_y \ V_z]$  representa las velocidades del dron en el sistema de referencia B y al multiplicarla por la matriz de rotación se obtienen las velocidades en el punto de inercia.

Una vez conseguida la posición del dron en el sistema E, hay que conseguir las ecuaciones del movimiento rotacional  $w$  del dron a través de las componentes de la variación respecto al tiempo de los ángulos roll, pitch y yaw.

La rotación yaw está sujeta a tres rotaciones en (z, y, x); pitch está sujeta a dos (y,x) y roll sólo depende de una rotación en el eje x. (Espinosa Acosta & Moya González, 2016), (Artale, Milazzo, & Ricciardello, 2013) (Samaniego Villacres & Vaca Cerda, 2017). La siguiente ecuación representa este cálculo:

$$w = W_{\eta} \dot{\eta}$$

donde la derivada de  $\eta$  es la variación con respecto al tiempo de roll, pitch y yaw y  $W_{\eta}$  representa las dependencias de cada movimiento rotacional sobre los ejes x,y,z de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = R(x, \phi) R(y, \theta) R(z, \psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + R(x, \phi) R(y, \theta) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R(x, \phi) \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Las componentes de las velocidades angulares en el eje x,y,z en el punto B, y viceversa, serán:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

$$\text{Donde } W_{\eta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = W_{\eta}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

**Ecuación 1.3. Modelo cinemático**

## 4.2. AERODINÁMICA

Otro factor importante a tener en cuenta al hacer un análisis del dron será el correspondiente a su aerodinámica. Para ello se hacen uso de las fórmulas de empuje y los momentos de arrastre producidos por las hélices:

$$\text{Fuerza de empuje: } F_{emp} = C_{emp} * \rho * D^4 * \omega^2$$

$$\text{Momento torsor: } M_{TORSOR} = \frac{C_P * \rho * D^5 * \omega^2}{2 * \pi}$$

**Ecuaciones 1.4 y 1.5. Fuerza de empuje y momento torsor**

donde,  $F_{emp}$  es la fuerza de empuje,  $C_{emp}$  es el coeficiente de empuje,  $\rho$  es la densidad del aire,  $D$  es el diámetro de las hélices,  $\omega$  es la velocidad angular,  $C_P$  es el coeficiente de potencia y  $M_{torsor}$ .

## 4.3. MODELO DINÁMICO

Para el desarrollo del modelo dinámico se asume que: el cuerpo central del dron es un sólido rígido libre con 6 GDL, la inercia de los rotores respecto a los ejes principales se considera nula, se desprecian las fuerzas centrífuga y de Coriolis (la trayectoria del dron es muy pequeña respecto a la Tierra), la aceleración de la gravedad es constante por el mismo motivo, se desprecia el efecto del viento en las hélices y se considera que las fuerzas de arrastre actúan siempre sobre el centro de masas.

Al aplicar las ecuaciones de Newton Euler al dron, se obtiene la fuerza que actúa sobre el cuadricóptero:



$$F_i = \frac{d}{dt} m V_B$$

#### Ecuación 1.6. Fuerza sobre el cuadricóptero

, donde  $F_i$  es la fuerza que actúa sobre el dron,  $m$  es la masa y  $V_B$  es la velocidad de translación en el sistema B.

La fuerza externa se constituye en: empuje de las hélices, fuerza gravitacional y la fuerza centrífuga.

Debido al tamaño del dron, se desprecian los efectos o pares aerodinámicos. Cada motor  $i$  tiene una velocidad angular  $\Omega_i$ , esta crea una fuerza referida al marco inercial del dron  $f_i = [0 \ 0 \ \Omega_i]$ , entonces el empuje total  $T_B$  está representado como  $T_B = [0 \ 0 \ U_1]$ , donde  $U_1$  es el empuje generado en el eje Z del sistema B:

$$U_1 = \sum_{i=0}^4 b \Omega_i^2$$

#### Ecuación 1.7. Empuje generado en el eje Z<sub>B</sub>

, donde  $b$  es el factor de empuje generado por las hélices en  $Ns^2$ . El empuje total en conjunto con la fuerza de la aceleración de la gravedad representa la sumatoria de fuerzas totales que opera sobre el dron; por tanto, el componente de translación referido al sistema de referencia queda expresado como:

$$m \dot{V}_B = -R^T F_g + T_B$$

#### Ecuación 1.8. Componente de translación

Para encontrar la fuerza con respecto al sistema inercial, se utiliza la ecuación:  $\dot{\epsilon} = R V$  y se la deriva para obtener  $\ddot{\epsilon} = R \dot{V}$  considerando que la fuerza gravitacional está definida como  $F_g = mg [0 \ 0 \ 1]$ , se obtiene el modelo dinámico de translación:

$$\ddot{\epsilon} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \frac{U_1}{m} \begin{bmatrix} (\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\theta) \\ (\sin\phi \sin\theta \cos\psi + \cos\phi \sin\theta) \\ (\cos\theta \cos\psi - mg) \end{bmatrix}$$

#### Ecuación 1.9. Modelo dinámico de translación de un cuadricóptero

Para hallar el factor rotacional, el cuadricóptero posee una configuración simétrica con relación a los ejes x,y,z; por ello se desprecian los valores giroscópicos, la matriz de inercia I es:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}$$

**Ecuación 1.10. Matriz de inercia**

Para hallar el momento total de I se considera los cambios del momento angular  $H = I \times \omega$ , y la siguiente ecuación:

$$M = \frac{d}{dt}(I\omega) + \omega \times (I\omega)$$

**Ecuación 1.11. Momento que actúa sobre el cuadricóptero**

El valor del momento total M, está determinado por los pares rotacionales generados por las hélices de los rotores y definidos como:

$$M = \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lb(\Omega_2^2 - \Omega_4^2) \\ lb(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d(\Omega_1^2 + \Omega_3^2 - \Omega_2^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix}$$

**Ecuación 1.12. Momentos generados por las hélices**

, donde l es la longitud del brazo hasta el centro de masa en unidades de metros y del coeficiente de arrastre asociado a las hélices en  $\text{Ns}^2$ .

Incluyendo las definiciones del modelo cinemático rotacional, los torques de las hélices, se presenta en la siguiente ecuación la dinámica que rige la rotación del cuadricóptero es:

$$\ddot{\eta} = \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\psi}\dot{\theta} \\ -\dot{\psi}\dot{\phi} \\ \dot{\phi}\dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(I_{yy} - I_{zz})\dot{\psi}\dot{\theta}}{I_{xx}} \\ \frac{(I_{zz} - I_{xx})\dot{\psi}\dot{\phi}}{I_{yy}} \\ \frac{(I_{xx} - I_{yy})\dot{\phi}\dot{\theta}}{I_{zz}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\tau_{\phi}}{I_{xx}} \\ \frac{\tau_{\theta}}{I_{yy}} \\ \frac{\tau_{\psi}}{I_{zz}} \end{bmatrix}$$

**Ecuación 1.13. Modelo dinámico rotacional**

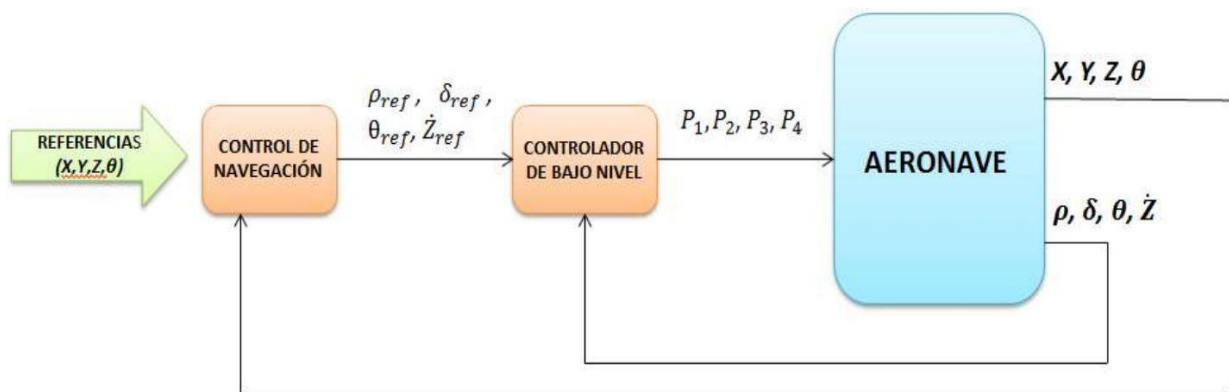
El modelo dinámico completo de un cuadricóptero es:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{(\cos\phi\sin\theta\cos\phi + \sin\phi\sin\theta)U_1}{m} \\ \ddot{y} &= \frac{(\sin\psi\sin\theta\cos\phi + \cos\psi\sin\phi)U_1}{m} \\ \ddot{z} &= [(\cos\theta\cos\phi - mg)]U_1/m \\ \ddot{\phi} &= \frac{[(I_{yy} - I_{zz})\dot{\psi}\dot{\phi} + \tau_{\phi}]}{I_{xx}} + \dot{\psi}\dot{\theta} \\ \ddot{\theta} &= \frac{[(I_{zz} - I_{xx})\dot{\psi}\dot{\phi} + \tau_{\theta}]}{I_{yy}} - \dot{\psi}\dot{\phi} \\ \ddot{\psi} &= \frac{[(I_{xx} - I_{yy})\dot{\phi}\dot{\theta} + \tau_{\psi}]}{I_{zz}} + \dot{\phi}\dot{\theta} \end{aligned}$$

**Ecuación 1.14. Modelo dinámico completo**

#### 4.4. ALGORITMOS DE CONTROL

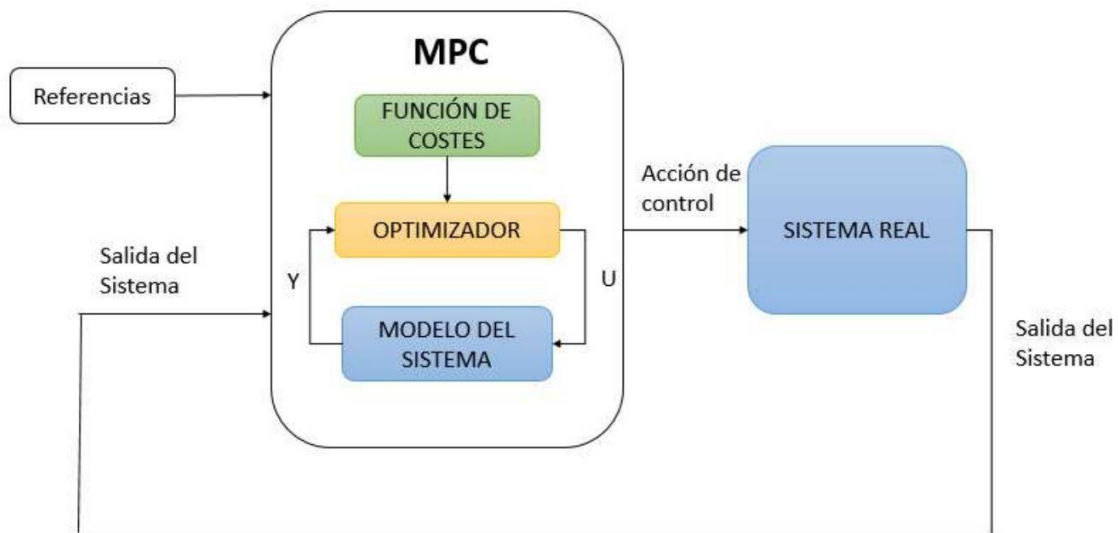
Para poder dotar a los UAVs de una mayor autonomía en vuelo es necesario incorporar algoritmos de control que permitan seguir trayectorias y otras funcionalidades más avanzadas tales como esquivar obstáculos. Los métodos predictivos basados en modelos han sido estudiados en diferentes artículos científicos. Dichos métodos predictivos (MPC) presentan unas características que los hacen muy adecuados para el control de vuelo de UAVs, como son el tratamiento matemático de restricciones en forma explícita y de predicciones de las trayectorias y eventos. Además, la formulación de estos algoritmos es muy versátil y permiten explotar funcionalidades avanzadas como el consumo de energía, la calidad de las estimaciones de la posición, la pérdida de datos y la capacidad de esquivar obstáculos.



Tradicionalmente, en el campo de los UAVs, las estrategias de control empleadas han sido basadas en PID. Sin embargo, existen técnicas de control más sofisticadas que pueden presentar características muy interesantes para el control de vuelo de UAVs. En concreto, el control predictivo basado en modelos (MPC) es una técnica de control cuyo uso en determinadas disciplinas se ha hecho cada vez más habitual con el paso de los años, debido a que aporta una serie de ventajas fundamentales con respecto a otras estrategias de control tradicionales. La principal característica de un controlador predictivo es que contiene un modelo interno del sistema a controlar utilizado para estimar la respuesta futura del sistema ante cada posible acción de control a realizar, razón por la cual se le denomina predictivo.

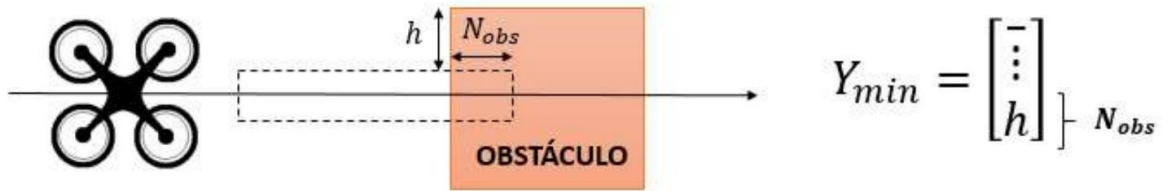
Otra de las características distintivas de los MPC es que se trabaja con los conceptos de horizonte de predicción y horizonte de actuación. Se basa en la búsqueda de una serie de múltiples referencias en distintos instantes de tiempo, cuyo número depende del horizonte

de predicción. El control predictivo además utiliza la optimización matemática del problema garantizando siempre que la solución es el óptimo global. De esta forma, el controlador realiza una serie de iteraciones internas para calcular la serie óptima de acciones de control a realizar, basándose en el modelo del sistema, y aplica la primera de ellas en cada instante. Además, otra ventaja fundamental de los controladores predictivos es la capacidad para incluir restricciones de forma explícita, tanto como valores límites en las salidas como para las acciones de control, limitando su velocidad de variación o su valor absoluto. A continuación observamos el esquema de funcionamiento del MPC.



- **Modelo del sistema:** Es utilizado para conocer la salida que presentará el sistema a controlar ante la aplicación de determinada acción de control en un horizonte de predicción  $N$ .
- **Función de costes:** Es un elemento fundamental en el control predictivo, ya que de ella dependen la acción de control calculada y la estrategia buscada por el controlador.
- **Optimizador:** Es el algoritmo encargado de resolver el problema de optimización buscando la secuencia de  $N_u$  acciones de control que minimizan la función de costes.

La ventaja fundamental de esta estrategia es que no es necesario planificar una ruta alternativa, sino que es el propio controlador el que busca una solución que se acerque a la de referencia, pero que no viole las restricciones presentadas.



Cuando el horizonte de predicción alcanza al obstáculo, es decir, que éste aparece en algunas de las referencias que van a aparecer en la función de costes, se calcula el número de referencias que caen dentro del obstáculo, representado en la figura como  $N_{obs}$ . De esta forma, para esquivar el obstáculo, aparece una restricción de movimiento lateral mínimo con respecto a la posición del UAV en ese instante para los últimos elementos del vector, de valor igual a la distancia que debe desviarse lateralmente según las dimensiones del obstáculo. De esta forma, las restricciones aparecen de forma progresiva.

## 5. CONTROL DE UN DRON (CUADRICÓPTERO)

Aparte del trabajo teórico, hemos realizado una tarea específica en la que se ha utilizado un dron cuadricóptero para mapear zonas desconocidas, aplicando los conocimientos que hemos obtenido a lo largo de la asignatura relacionado con los turtlebots.

### 5.1 INSTALACIÓN DE PAQUETES

Una de las partes más complicadas ha sido la investigación que hemos realizado para encontrar los paquetes necesarios para poder realizar la tarea.

Primero empezamos buscando tutoriales en la página web TheConstruct que ofrece multitud de prácticas gratuitas relacionadas con ROS, debido a que este tutorial era de pago decidimos seguir investigando por foros y finalmente encontramos un paquete para la versión Melodic de linux que incluía un pequeño índice de cómo teleoperar el robot que ofrecía.

Una vez instalado, podíamos simular y teloperar un dron cuadricóptero por diferentes mapas como llanuras e interiores. Es por ello por lo que utilizamos este dron como herramienta para combinarla con las prácticas de los turtlebot y finalmente conseguir un programa que fuese capaz de mapear entornos desconocidos.

## 5.2 PROCESO

Una vez instalados los paquetes ya se podía simular el dron en Gazebo y Rviz, por lo que busqué cuales eran los topics utilizados por el dron para poder aplicar el mapeo. Es por ello por lo que encontré que el dron utilizaba como escáner el topic `/scan`, y como frames el `world` y el `base_footprint`.

Por lo que modificando estos valores en el archivo del turtlebot para mapeo pude crear un archivo que se encargará de lanzar el nodo `slam_gmapping` y fuese capaz de leer los datos del entorno.

## 5.3 CONSTRUCCIÓN DEL MAPA

Para realizar el mapeo realizamos los siguientes pasos en la terminal:

1. `roscore`
2. `roslaunch hector_quadrotor_demo outdoor_flight_gazebo.launch :`

Esta instrucción lanza el archivo que inicia los nodos para ejecutar el entorno de simulación Gazebo con el mapa especificado (en este caso `outdoor_flight` ), el entorno de visualización y mapeo Rviz y además realiza un spawn del dron en ambos entornos.

3. `roslaunch quadrotor_navigation quadrotor_mapping.launch :`

En cuanto a esta línea de comando, ejecuta el archivo que inicia el nodo de mapeo `slam_gmapping` del paquete `gmapping`, en el que se tuvo que indicar la odometría del dron, el tópic del escáner que se utilizará para el mapeo y la base de este.

4. `rosservice call /enable_motors "enable: true":`

Este comando activa los motores del dron para poder realizar su posterior teleoperación en el entorno de simulación.

5. `roslaunch teleop_twist_keyboard teleop_twist_keyboard.py:`

Esta línea ejecuta el archivo de python que se encarga de crear un entorno con el cual se puede controlar al dron mediante el teclado del ordenador.

6. `roslaunch map_server map_saver -f [nombreMapa]:`

Con esta instrucción guardamos el mapa que se ha generado tras realizar el mapeo del entorno de simulación.

## 5.4 EJEMPLO DE MAPEO

Como ejemplo de mapeo hemos utilizado el dron en un entorno abierto como se puede apreciar en el siguiente video:

[Mapeo de exteriores mediante un cuadricóptero.](#)

En este video enseño como realizar el mapeo de un entorno utilizando el dron, además los mapas obtenidos son los siguientes:



**Mapa obtenido en el vídeo**



**Mapa obtenido tras un largo periodo de exploración**

Junto con estas imágenes hemos obtenido también los ficheros con extensión.yaml los cuales dan información sobre el mapa para su posterior uso (como localización).

## 5.5 CONCLUSIÓN SOBRE EL CONTROL DE UN DRON

Cómo se puede comprobar, con lo aprendido en clase con los turtlebots es posible realizar el control de cualquier tipo de robot si se tienen los paquetes necesarios para poder hacerlo. En este caso hemos conseguido realizar el mapeo de un exterior, pero igualmente es posible aplicarse para cualquier entorno en el que funcione el dron.

Además, cabe destacar que con la información que hemos conseguido también se podría haber mejorado la tarea aplicando algún algoritmo de localización, para controlar el dron a lo largo del mapa conocido, como el ACML.

En conclusión, hemos aplicado los conocimientos adquiridos durante las clases de prácticas para desarrollar de una manera más práctica el trabajo teórico sobre los drones.



## 6. REFERENCIAS

Ref 1: Diseño de un dron programable de bajo coste

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12091/396747.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

Ref 2: Diseño y construcción de drone autónomo para medición de radiación solar

<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/87297/TFG-2257-HINOJOSA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ref 3: Diseño y fabricación de un dron

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73170/RUIP%C3%89REZ%20-%20Dise%C3%B1o%20y%20fabricaci%C3%B3n%20de%20un%20dron%20mediante%20impresi%C3%B3n%203D.pdf?sequence=5>

Ref 4: Funcionamiento de un dron. Lo que debes saber

<https://aerlyper.es/funcionamiento-de-un-dron-lo-que-debes-saber/>

Ref 5: Modelado y estabilización de un helicóptero con cuatro motores

<file:///C:/Users/Asus/Downloads/1-s2.0-S1697791207701917-main.pdf>

Ref 6: Desarrollo de un modelo matemático, cinemático y dinámico para funcionamiento de un dron

<file:///C:/Users/Asus/Downloads/Dialnet-DesarrolloDeUnModeloMatematicoCinematicoYDinamicoC-7402300.pdf>

Ref 7: Tipos de drones

<https://novodrone.com/tipos-de-drones/>

Ref 8: Hector quadrotor

[http://wiki.ros.org/hector\\_quadrotor](http://wiki.ros.org/hector_quadrotor)

Ref 9: 2D Drone Navigation (Part 1 Mapping):

<https://www.youtube.com/watch?v=dND4oCMgmRs>