



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE GRADO

TÍTULO DEL TFG: Laboratorio indoor de ensayos y medida de drones

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Aeropuertos

AUTOR: Óscar Román Rivero

DIRECTOR: Jordi Berenguer i Sau

FECHA: 28 de Julio de 2016

Título: Laboratorio indoor de ensayos y medida de drones

Autor: Óscar Román Rivero

Director: Jordi Berenguer i Sau

Fecha: 28 de Julio de 2016

Resumen

El objetivo de este trabajo de fin de grado es la definición del equipamiento necesario a instalar en un laboratorio cerrado de ensayo de drones a fin de poder medir y caracterizar su comportamiento aerodinámico, la robustez y precisión de los sistemas de control y guiado, el ajuste y calibración de determinados tipos de carga útil, y el análisis de su comportamiento frente a perturbaciones tanto aerodinámicas como electromagnéticas.

En el primer capítulo se realiza una caracterización y clasificación de los UAV y se presenta la legislación vigente que limita drásticamente el uso de los drones, por lo que surge la necesidad de disponer de un espacio cerrado donde poder realizar tests, investigaciones, tomar datos, calibraciones o simulaciones para prever el comportamiento del UAV.

En el capítulo dos se dan especificaciones de esta infraestructura así como los posibles usos que tiene y su localización óptima.

Los capítulos tres, cuatro y cinco tratan sobre ensayos de diferentes ámbitos a realizar en el laboratorio: de aerodinámica, control y guiado, y carga útil, respectivamente.

Gracias a su equipamiento tecnológico, en el laboratorio se podrán medir y caracterizar parámetros como la estabilidad y precisión de la trayectoria del drone, su posición, altitud, velocidad y ángulos aerodinámicos y realizar tests con diferentes tipos de cargas útiles.

Todos estos parámetros se podrán medir en un ambiente en reposo o con perturbaciones generadas en el laboratorio, tanto aerodinámicas como electromagnéticas, analizando así el comportamiento de la aeronave y pudiendo mejorar su actuación.

Title: Indoor measurement and performance's drones laboratory

Author: Óscar Román Rivero

Director: Jordi Berenguer i Sau

Date: 28th of July of 2016

Overview

The aim of this project is the definition of the necessary equipment installed in a closed test drone's laboratory in order to measure and characterize its aerodynamic performance, robustness and accuracy of the systems of control and guidance, the adjustment and calibration of certain types of payload, and the analysis of their behaviour in both aerodynamic and electromagnetic disturbances.

Chapter one discusses the characterization and classification of UAVs and the actual legislation, that drastically limits the use of drones, which creates the need to have a closed space to perform tests, investigations, calibrations, collect data, or do simulations to predict the behaviour of the UAV.

In Chapter two specifications of this infrastructure, optimal location and the possible uses are detailed.

Chapters three, four and five deal with different tests to perform in the laboratory: classified in aerodynamics, control and guidance, and payload tests respectively.

Due to its technological equipment, in the laboratory we can measure and characterize parameters such as stability and accuracy of the trajectory of the drone, position, altitude, velocity, and aerodynamic angles: and perform tests with different types of payloads.

All these parameters can be measured in an atmosphere at rest or with disturbances generated in the laboratory, both aerodynamic and electromagnetic and analysing the behaviour of the aircraft being able to improve performance.

Este proyecto cierra una etapa crucial de mi vida. Además de todos los conocimientos adquiridos, de mi etapa universitaria me llevo muy buenos amigos y la persona más increíble que he conocido nunca.

No quiero despedirme sin agradecer la ayuda a las personas por las cuales hoy estoy realizando este proyecto:

A mis sponsors oficiales: mis padres y hermano, por todo el apoyo y buenas vibraciones que me han transmitido a lo largo de estos años y el lema de constancia y esfuerzo que me han inculcado.

A ti Desi, mi compañera perfecta tanto en lo profesional como en lo personal. Por hacer más amenos los interminables días de estudio, por estar siempre ahí brindándome una sonrisa, sabes que eres fundamental para mí.

A Jordi, por su apoyo, ayuda y dirección de este proyecto.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DE UAV	4
1.1. Clasificación de UAVs	4
1.2. Legislación de UAVs	8
1.2.1. Legislación nacional	8
1.2.2. Legislación Europea	9
CAPÍTULO 2. LABORATORIO	11
2.1. Localización	11
2.2. Interior	13
CAPÍTULO 3. ENSAYOS AERODINÁMICOS Y FÍSICOS	14
3.1. Ensayos a realizar en el laboratorio	14
3.1.1. Medidas invasivas	14
3.1.2. Medidas no invasivas	16
3.2. Equipos para la generación de perturbaciones	18
3.2.1. Comportamiento frente al viento	18
3.2.2. Aspersores para simulación de lluvia	19
CAPÍTULO 4. CONTROL Y GUIADO	20
4.1. Piloto automático	20
4.2 Sistemas de geoposicionamiento	23
4.2.1. Sistemas inalámbricos	24
4.2.2. Sistema de navegación inercial.....	24
4.2.3. Campo magnético	25
4.2.4. Método óptimo: trilateración	25
4.3. Estación de tierra	28
4.3.1. Sistema de comunicación entre el avión y la estación tierra.....	29
4.3.2. Equipo de control de mando	30
4.3.3. Equipo de recepción y visualización de vídeo/audio.....	31
4.3.4. Concepto del sistema completo	32
4.4. Ensayo a realizar en el laboratorio	33
CAPÍTULO 5. CARGA ÚTIL	34
5.1. Aplicaciones	34
5.1.1. Control de calidad del aire.....	34

5.1.2. Aplicaciones cartográficas.....	37
5.1.3. Aplicaciones topográficas.....	38
5.1.4. Magnetometría aérea	41
5.1.5. Aplicaciones en agricultura	42
5.1.6. Aplicaciones al mantenimiento de obras o estructuras como líneas eléctricas o aerogeneradores. Imagen visual y termografía.....	43
5.2. Ensayos a realizar en el Laboratorio.....	44
5.2.1. Cámaras.....	45
5.2.3. Otros ensayos	46
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFÍA.....	51
ANEXOS.....	52

INTRODUCCIÓN

Si nos remontamos a sus inicios, el uso de los drones comenzó siendo una herramienta puramente militar, desarrollándose a lo largo de los años hasta hoy en día, donde se ha convertido en un abanico de posibilidades de crecimiento exponencial, estando al alcance de cualquiera.

Las primeras aeronaves no tripuladas que se conocen, se remontan a la guerra civil estadounidense, enviaban globos con cargas explosivas tratando de que llegaran a los polvorines del enemigo para hacerlo estallar por los aires. No tuvieron un gran éxito ya que se dieron cuenta de que eran inexactos y poco fiables. Más tarde, durante la segunda guerra mundial Estados Unidos creó un prototipo de UAV conocido como *Operación Afrodita*. Eran aviones B-17 controlados remotamente repletos de aproximadamente nueve toneladas de explosivos que se hacían estrellar contra objetivos estratégicos, resultando un gran éxito en las ofensivas militares.

Los drones entraron en el mundo del espionaje en la década de los sesenta. De nuevo con Estados Unidos como protagonista, que diseñó una especie de avión teledirigido, el *Firebee* para espionaje y reconocimiento fuertemente usado sobre la República Comunista de China. Durante la guerra de Vietnam se usaron varios *Firebees* de reconocimiento con cámaras de día. Posteriormente se fueron implementando tecnologías como cámaras nocturnas y comunicaciones e inteligencia electrónica. En la guerra del golfo se utilizó el *Predator*, capaz de volar 700 kilómetros, con una autonomía de 24 horas y con dos puntos de anclaje de misiles *Hellfire* o *Stinger*.

Actualmente, además de aplicaciones militares, hay un gran interés en desarrollar UAV para aplicaciones civiles. Por esto, el número de grupos de investigación y empresas para crear y comercializar este tipo de sistemas se ha ido multiplicando a un ritmo frenético en los últimos años. Dado que la gran mayoría de aplicaciones se basan en el pilotaje remoto de dichas aeronaves, se ha ido imponiendo la denominación RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) para denominar al subconjunto de UAV que no son totalmente autónomos, y para los cuales se está trabajando en su desarrollo legislativo a nivel europeo.

Así pues, a día de hoy los drones además de en su faceta militar, tienen aplicaciones en el ámbito civil, de uso profesional y ocio. Las aplicaciones de uso civil de UAVs pueden ser infinitas, tardando unas décadas en llegar, sin embargo, algunas ya son una realidad. A continuación, se detallan algunas de ellas con ejemplos de aplicación.

De uso profesional:

- Seguridad: vídeo, alertas.
- Inspecciones: edificaciones, infraestructuras viarias, redes eléctricas, centrales nucleares, oleoductos y gasoductos, o cualquier infraestructura que genere peligro para un ser humano.
- Investigación: recopilación de datos, mapeo.
- Emergencias: evaluación y respuesta.
- Medio ambiente: agricultura, control de especies, medicina forense.
- Búsqueda y rescate de personas: terremotos, tsunamis, avalanchas, incendios.
- Eventos: grabación de imágenes de manera versátil con infinidad de ángulos: eventos deportivos, publicidad, manifestaciones...
- Entrega de pedidos: alimentación, correo.
- Vigilancia de fronteras
- Manipulación de materiales peligrosos

De ocio:

- Carreras FPV, vuelo libre, licencias de piloto.

Todas estas aplicaciones conllevan además una serie de ventajas respecto a la actuación humana, especialmente en todas aquellas misiones que por su carácter monótono pueden provocar la pérdida de atención de los pilotos humanos.

Otro tipo de misiones son las de reconocimiento militares o en ambientes tóxicos, en las que existe un riesgo humano que puede cobrarse en vidas, por tanto el uso de UAVs da una mayor seguridad.

La reducción de coste en las misiones es otra de las ventajas de los drones frente a las aeronaves convencionales, el hecho de que no tenga que transportar tripulación alguna posibilita un tamaño mucho más pequeño de la aeronave, lo que normalmente se traduce en una reducción del coste de fabricación, mantenimiento y operación y, por tanto, del coste de la hora de vuelo, o lo que es más importante, el de la adquisición de la unidad de información deseada. Además, ese menor tamaño, permite realizar operaciones que no serían viables con aeronaves tripuladas como puede ser el volar en interiores de edificios, o acercarse mucho más al objetivo realizando maniobras de alta precisión con radios de giro extremadamente reducidos.

Por tanto, realizar este tipo de misiones con drones se traduce en un menor tiempo de trabajo, costes menores, reducción de riesgo en ambientes peligrosos y supresión de trabajos monótonos para los seres humanos.

La legislación española vigente para UAVs es muy restrictiva, limitando en gran medida el desarrollo de esta tecnología y las ventajas que trae consigo. El uso de drones para aplicaciones civiles tiende a crecer exponencialmente, pero se ve limitada por la ley actual, haciendo recorrer grandes distancias fuera de las grandes poblaciones a profesionales que requieran volar un UAV para tomar

datos, o quieran probar su comportamiento cuando se le equipa con algún tipo de carga útil, o simplemente aficionados que quieran volar su drone.

Debido a la situación actual, regida por la legislación española que limita en gran medida el uso de RPAS, y a la constante evolución de este sector, se requiere de una infraestructura para su óptimo desarrollo e investigación.

El objetivo de este proyecto es la definición del equipamiento necesario a instalar en un laboratorio cerrado de ensayo de drones a fin de poder medir y caracterizar su comportamiento aerodinámico, la robustez y precisión de los sistemas de control y guiado, el ajuste y calibración de determinados tipos de carga útil, y el análisis de su comportamiento frente a perturbaciones tanto aerodinámicas como electromagnéticas.

CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DE UAV

1.1. Clasificación de UAVs

Un UAV (Unmanned Air Vehicle), también conocido como Dron, de manera simplificada es una aeronave en la que se suprime la tripulación y se sustituye por un sistema informático y un radioenlace de transmisión de datos. Los UAVs se distinguen de las aeronaves de radiocontrol porque aunque puedan ser controlados desde una ubicación remota, también son sistemas autónomos que pueden operar sin intervención humana alguna, debido a su inteligencia artificial.

Los UAV se pueden clasificar atendiendo a varios criterios, una primera forma de clasificarlos es según su tamaño y peso, las categorías son las siguientes:

Tamaño de UAV	Peso
Micro	< 1 Kg
Mini	1-10 Kg
Pequeño	10-50 Kg
Mediano	50-100 Kg
Grande	> 100 Kg

Tabla 1 Clasificación de UAVs según su peso

Según sus características de despegue y sustentación, se distinguen varios tipos de UAV:

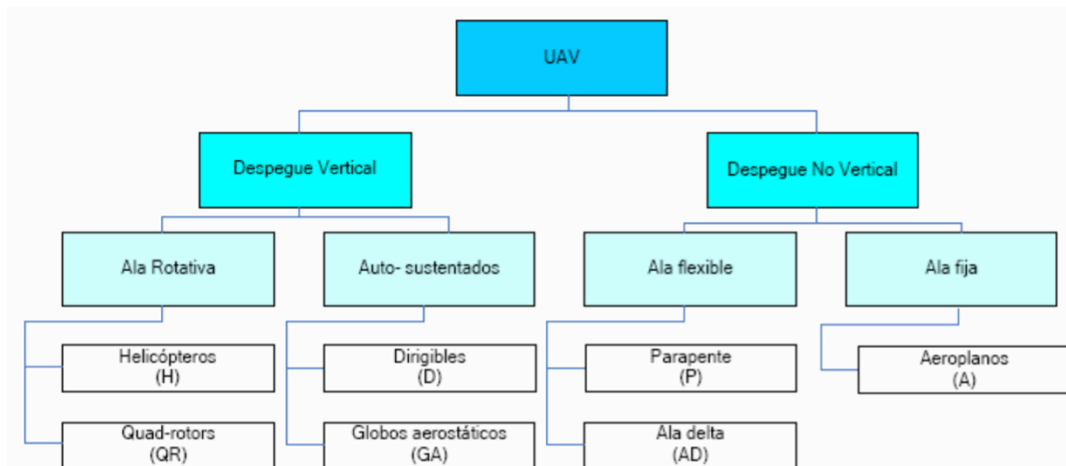


Fig. 1.1 Clasificación de UAV según sus características de despegue y forma de crear sustentación

El presente proyecto tratará aeronaves de cualquier tamaño VTOL (Vertical Take-Off and Landing) de despegue y aterrizaje vertical, con rotores, debido a que en un laboratorio de test de drones como el que se pretende diseñar es inviable volar aeronaves de ala fija que precisen de carrera de despegue y aterrizaje horizontal.

A una escala relativamente pequeña, como es el caso de los drones, los quadrotors son más baratos y más duraderos que los helicópteros convencionales debido a su simplicidad mecánica.

A una escala mayor, como la de los helicópteros convencionales, los quadrotors pierden sus ventajas: el aumento de tamaño de las hélices aumenta su impulso. Esto significa que los cambios en la velocidad de la hélice son más lentos, lo que repercute negativamente en el control: el aumento de la eficiencia se consigue por tanto a costa de control. Los helicópteros, sin embargo, no experimentan este problema, ya que el aumento del tamaño del disco del rotor no afecta de manera significativa a la capacidad de control.

Por tanto, para la realización de este proyecto nos centraremos en los drones de ala rotatoria, concretamente en los quadrotors, con mejores prestaciones que los helicópteros unirotores para dimensiones de UAVs.



Fig. 1.2 Aspecto de un quadrotor genérico

Un quadrotor es un helicóptero que opera con cuatro rotores de los cuales obtiene su sustentación y propulsión. Los cuatro rotores están generalmente dispuestos en forma de cruz. A fin de evitar que el dron se tumbes respecto a su eje de orientación es necesario que dos hélices giren en sentido anti horario y las otras dos en sentido horario.

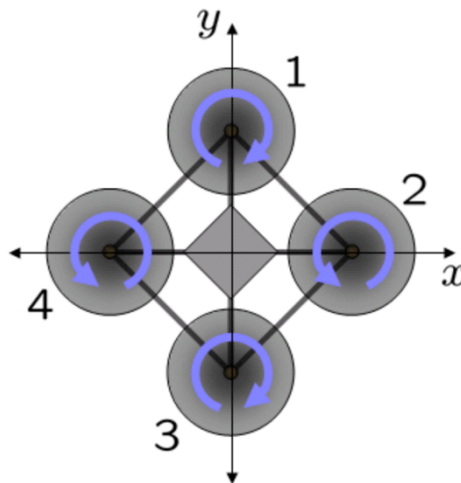


Fig. 1.3 Esquema de rotación de los pares de hélices

Para poder dirigir el quadrotor hay que hacer que cada uno de los pares de hélices giren en el mismo sentido. El control del movimiento del vehículo se consigue variando la velocidad relativa de cada rotor para cambiar el empuje y el par motor producido por cada uno de ellos.

Cada rotor produce sustentación sobre su centro de rotación, así como una fuerza de empuje opuesta a la dirección de vuelo del vehículo. Si todos los rotores están girando a la misma velocidad angular, con los rotores uno y tres en sentido horario y los rotores de dos y cuatro en sentido anti horario, el par aerodinámico, y por lo tanto la aceleración angular alrededor del eje de guiñada de rotación, es exactamente cero, lo que significa que no hay necesidad de la existencia de un rotor de cola como en helicópteros convencionales.

Para un mejor rendimiento y algoritmos de control más simples, los motores y las hélices deben ser colocados equidistantes. En cuanto a materiales se refiere recientemente los compuestos de fibra de carbono se han hecho populares debido a su ligereza y rigidez estructural.

El control de un quadrotor se rige por los mismos tres ángulos aerodinámicos que cualquier aeronave: guiñada (yaw), cabeceo (pitch), y alabeo (roll), según el eje de rotación.

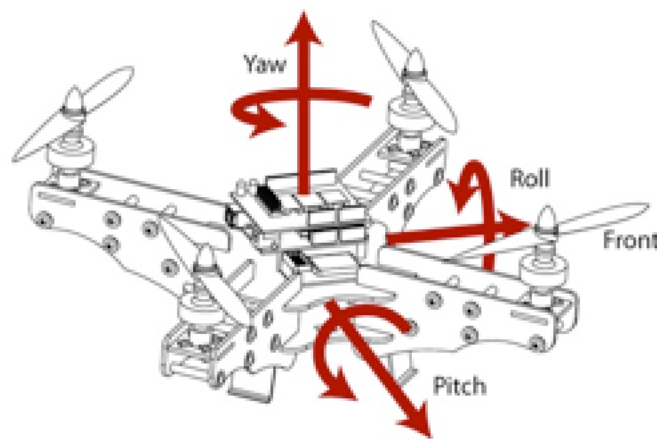


Fig. 1.4 Ángulos aerodinámicos de un quadrotor

Para ajustar el ángulo de guiñada, un quadrotor aplica más empuje a un par del motor, sentido horario o anti horario.

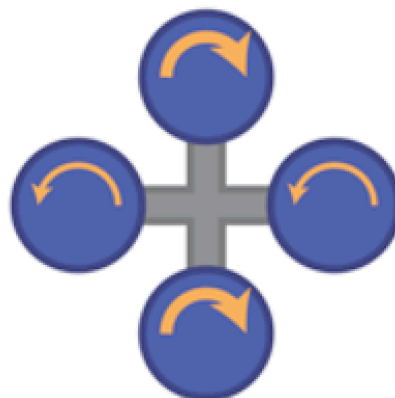


Fig. 1.5 Configuración de rotores para ajustar el ángulo de guiñada

Para ajustar el alabeo o el cabeceo, el quadrotor aplica mayor empuje a uno de los rotores y menos empuje a su otro rotor del par motor.

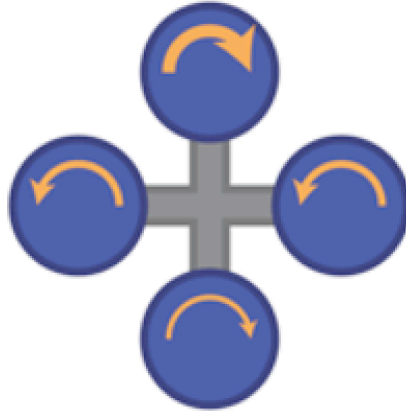


Fig. 1.6 Configuración de rotores para ajustar alabeo y cabeceo

Los principales componentes de un quadrotor son los mecánicos (el chasis, y los motores propulsores), la electrónica de control de velocidad (ordenador o controlador en placa de a bordo) y la batería. Además, se equipan de un transmisor para su pilotaje remoto.

1.2. Legislación de UAVs

1.2.1. Legislación nacional

La legislación española para el uso de UAV es muy restrictiva, limitando la mayor parte de posibilidades de vuelo. De la prohibición total del uso de drones para aplicaciones civiles, tanto profesionales como de ocio, establecida a principios de 2014 por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), se pasó a la Ley 18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, en cuya sección 6ª se recoge el régimen temporal para las operaciones con aeronaves pilotadas por control remoto, los llamados drones, de peso inferior a los 150 kg al despegue, en el que se establecen las condiciones de explotación de estas aeronaves para la realización de trabajos técnicos y científicos.

Las actividades aéreas según esta normativa, se pueden desarrollar de las siguientes maneras:

- VLOS (Visual Line Of Sight operations): 400 fts (120 m) de altura máxima y 500 m de distancia desde el operador, para aeronaves de hasta 25 kg a una distancia superior a 8 km de un aeropuerto u aeródromo. Esta norma es muy restrictiva en comparación a otros países que establecen el límite de 150 kg.

- BVLOS (Beyond Visual Line Of Sight operations): 400 fts (120 m) de altura sólo para aeronaves de masa inferior a 2 kg, con medios para conocer la posición de la aeronave y emisión de NOTAM previo a la operación a una distancia superior a 15 km de un aeropuerto u aeródromo si la infraestructura cuenta con procedimientos de vuelo instrumental.

Hay una serie de zonas prohibidas como las urbanas, aglomeraciones de personas, espacio aéreo controlado o inmediaciones de aeropuertos. En cualquier caso será necesaria la identificación de la aeronave y del operador y para aeronaves de más de 25 kg de peso máximo al despegue, es necesario disponer también del certificado de aeronavegabilidad. Además, se debe enviar una comunicación previa a AESA con al menos cinco días de antelación al vuelo, y esperar a que quede aprobada para poder ejecutarlo.

1.2.2. Legislación Europea

A semejanza del planteamiento de Estados Unidos, donde la Federal Aviation Administration (FAA) busca la manera de integrar los UAS en el espacio de vuelo convencional, la Comisión Europea está trabajando en la regulación del sector, tratando de armonizar las normativas que en la actualidad aplican los estados miembros.

Actualmente en la UE a nivel legal se establecen dos grandes grupos de RPAS cada uno de los cuales está regulado por diferentes autoridades:

- Peso superior a 150 kg: European Aviation Safety Agency (EASA)
- Peso inferior a 150 kg: Autoridades nacionales de aviación civil

Las ideas que desarrolla la Unión Europea para la regulación del uso de RPAS son las recogidas en la declaración de Riga, del 6 de Marzo de 2015, y son las siguientes:

1. Los drones tienen que ser tratados como nuevos tipos de aviones con reglas proporcionales en función del riesgo de cada operación.
2. Las normas de la UE para la prestación de los servicios de seguridad de aviones no tripulados se deben desarrollar ahora.
3. Deben desarrollarse tecnologías y estándares para la plena integración de aviones no tripulados en el espacio aéreo europeo.

Para ello propone la creación de una serie de normas acorde al riesgo de operación del UAV, distinguiendo tres niveles:

- Bajo riesgo: Estas actividades no tendrán reglas específicas de aviación, considerando actividades como volar un drone propio, fotografía, operaciones industriales o agricultura.

- Riesgo dependiente del tipo de operación: equivale a las actividades de aviación privada y trabajo aéreo con pequeñas aeronaves y helicópteros. Actuaciones como inspecciones de infraestructuras, operaciones comerciales o filmación de eventos deportivos. La UE propone la creación de unas normas de aviación específicas adaptadas al nivel y naturaleza del riesgo, reguladas por las autoridades de aviación.
- Riesgo tradicional: equivalente al transporte de pasajeros y carga de aeronaves convencionales. Propone la creación de normas de aviación específicas, reguladas por las autoridades de aviación y además licencia de piloto, certificación de aeronaves y manual de operaciones.

Así pues se busca flexibilizar y adaptar la regulación del uso de drones de acuerdo a su riesgo, para integrar este tipo de aeronaves en el espacio aéreo y aprovechar su potencial. De momento es una medida que está en evolución.

Debido a la situación actual, regida por la legislación española que limita en gran medida el uso de RPAS, y a la constante evolución de este sector, se requiere de una infraestructura para su óptimo desarrollo e investigación.

Por este motivo el objetivo del proyecto es disponer de un espacio cerrado donde poder realizar tests, investigaciones, tomar datos, calibraciones o simulaciones para prever el comportamiento del UAV en un ambiente en reposo o ante perturbaciones aerodinámicas o electromagnéticas. Todo ello sin tener que desplazarse grandes distancias hasta un espacio abierto que cumpla los requisitos legales.

CAPÍTULO 2. LABORATORIO

2.1. Localización

El Parque Mediterráneo de la Tecnología (PMT) de Castelldefels es el lugar en que se pretende instalar una infraestructura de este tipo al contar con centros universitarios que imparten estudios de ingeniería aeronáutica, de telecomunicación y agricultura y contar con empresas y centros públicos de investigación con intensa actividad relacionada con los drones y sus aplicaciones.

Como hemos comentado, debido a la actual situación es necesario disponer de un recinto cerrado, lo suficientemente amplio, en el que se puedan realizar de forma controlada y segura, de acuerdo con la normativa vigente, todas aquellas pruebas relacionadas con la aeronave y su aplicación.

El proyecto del laboratorio consiste en la construcción de una estructura ligera y cerrada de forma cúbica de dimensiones 50 metros de ancho por 50 metros de largo y 15 de altura, cubierta por una malla no metálica, que actuaría a modo de laboratorio “indoor” para realizar en su interior los ensayos y pruebas con las aeronaves pilotadas de forma remota de despegue vertical, como comentamos en el capítulo 1, debido a la inviabilidad de realizar una carrera de despegue en la superficie.

El laboratorio deberá permitir actividades diversas, como:

- Realización de pruebas de vuelo, calibrado de sensores y puesta a punto de los motores de los helicópteros, ensayos de sistemas de comunicaciones y de control.
- Pruebas sobre cargas útiles en aplicaciones de agricultura de precisión, geomática, control e inspección de instalaciones, protección medioambiental, control de plagas, etc.
- Instalación de sensores en el recinto de pruebas a fin de medir los parámetros de los RPAS.
- Pruebas de navegación y control de la aeronave frente a situaciones de ausencia, interferencia o fallo de las señales GNSS.
- Pruebas de seguridad e integridad en los sistemas de comunicaciones.
- Creación de distintos escenarios para el ajuste de las misiones.

- En general todas aquellas actividades de investigación y desarrollo relacionadas con los sistemas de propulsión, estabilidad, control y guiado de aeronaves, y sus sistemas de telecontrol, telemetría y procesamiento y transmisión de datos de RPAS, previas a su vuelo en espacio libre de acuerdo con la normativa vigente.

Se ha realizado un estudio geográfico de la zona para determinar la localización óptima en el campus, llegando a la conclusión de que hay dos emplazamientos óptimos.



Fig. 2.1 Localización de los posibles emplazamientos

En la siguiente tabla se detallan datos superficiales de los dos emplazamientos:

Emplazamiento	A	B
Dimensiones (m)	60x140	50x60
Superficie (m ²)	8400	3000
Desnivel existente (m)	+1	+4

Tabla 2 Datos superficiales de los dos emplazamientos

Pese a que los dos emplazamientos en cuanto a dimensiones son aptos, se ha escogido el "A" como óptimo, dada su mayor superficie para posibles expansiones de cara al futuro.

Además de la estructura, el laboratorio necesitará disponer de acceso a la red eléctrica y de servicio de datos, habilitando un recinto cerrado para dichos equipos. En la localización del campus no sería un problema, ya que son servicios ya disponibles en la actualidad.

2.2. Interior

En el laboratorio se podrían simular diferentes escenarios para estudiar el comportamiento de las aeronaves con sus diferentes tipos de carga útil ante por ejemplo fuertes vientos, lluvia, o emisiones electromagnéticas interferentes.

Además, el espacio de vuelo deberá cumplir algunos requisitos como proporcionar señales GPS, equipamiento de sensores, generación de frecuencias y otras tecnologías que serán descritas a lo largo del proyecto.

Básicamente diferenciaremos tres tipos de ensayos a realizar en el interior del laboratorio: aerodinámicos y físicos, de control y guiado y de carga útil, los cuales serán tratados en los próximos capítulos, junto a el equipamiento tecnológico necesario para medir los parámetros.

CAPÍTULO 3. ENSAYOS AERODINÁMICOS Y FÍSICOS

Desde el punto de vista de los ensayos aerodinámicos y físicos, hay una serie de parámetros importantes a medir en un UAV como son la estabilidad y la precisión de la trayectoria, ángulos aerodinámicos, altura, aceleración, temperatura, potencia de los motores, o el comportamiento ante turbulencias y/o situaciones climatológicas adversas como viento o lluvia.

Por tanto, nuestro laboratorio deberá poder generar las perturbaciones y turbulencias para simular éstas situaciones adversas y medir el comportamiento de las aeronaves frente a ellas. Para ello se deberá contar con dos entornos de medidas:

- no invasiva: equipos externos, es decir sin manipular el UAV
- invasiva: equipos internos, los cuales se instalan momentáneamente en el UAV para realizar pruebas y obtener datos.

3.1. Ensayos a realizar en el laboratorio

3.1.1. Medidas invasivas

Para estudiar parámetros internos de los drones, se dispondrá de diferentes sensores, que se colocan en el dron antes de realizar las pruebas y se retiran al finalizarlas.

El encargado de almacenar los datos obtenidos por los sensores es la CPU (unidad central de procesamiento). Se encarga del tratamiento de datos de los sensores, el manejo de los puertos de entrada y salida para el GPS y el manejo de las comunicaciones con la estación de tierra. Además debe tener suficiente memoria RAM y memoria flash para el almacenamiento de los datos obtenidos, el código fuente de piloto automático y la ejecución.

Mediante un radioenlace, la aeronave se comunica con la estación de tierra, tal como se explicará en el capítulo 4.

3.1.1.1. Unidad de medida inercial (IMU)

El sistema de medida inercial está compuesto por cuatro tipos de sensores: acelerómetro y giroscopio triaxiales digitales, magnetómetro triaxial y sensor barométrico.

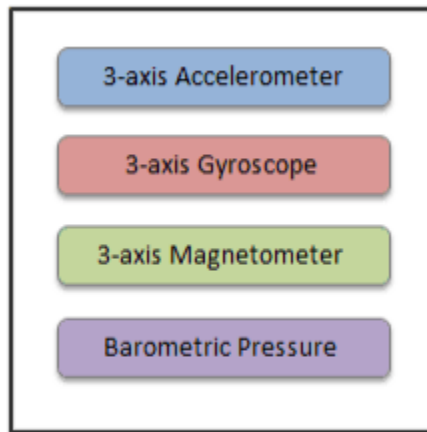


Fig. 3.1 Componentes de la IMU

1. Acelerómetro triaxial digital

Este sensor mide la aceleración estática en el eje vertical, como la gravedad y la aceleración dinámica, en el eje horizontal, en un plano XY.

2. Giróscopo triaxial digital

Un giroscopio triaxial permite medir, mantener y cambiar los ángulos de ubicación del dron en el aire.

Normalmente, el giroscopio viene incorporado en la misma unidad que el acelerómetro triaxial, de esta manera, el acelerómetro calcula la posición y el giroscopio el ángulo en el que se encuentra.

3. Magnetómetro

El magnetómetro es un componente electrónico capaz de medir y cuantificar la cantidad de fuerza magnética de un objeto. Una de sus aplicaciones fundamentales es actuar como brújula, detectando el polo norte magnético para contribuir en la orientación de la aeronave.

4. Barómetro

Este sensor permite calcular la altura a la que nos encontramos en base a la presión atmosférica y además ayudar al posicionamiento del GPS de nuestro dispositivo.

3.1.1.2. Otros sensores:

Además de los sensores para conocer parámetros aerodinámicos de la aeronave, se pueden incorporar multitud de tipos de sensores, según lo que interese medir en el dron. A continuación se proponen algunos de ellos:

Sensor de proximidad

Sensores de proximidad formados por un LED infrarrojo y un receptor IR. Para detectar proximidad, este sensor emite la luz infrarroja, siendo devuelta al receptor en el momento en que un objeto interfiere.

Sensor temperatura

Sensor para comprobar la temperatura de los componentes internos, como el procesador o la batería, componentes que es importante que no se sobrecalienten para no tener fallos o riesgo de deterioro.

Sensor de Intensidad

Sensor que permite conocer la intensidad eléctrica que pasa por él, permite conocer el consumo de cada dispositivo.

Sensor de velocidad

El sensor de velocidad está formado por una bobina de alambre y un imán. Están colocados de forma que al moverse el cárter, el imán permanece inmóvil. Se crea un movimiento relativo en el campo magnético y la bobina provoca una corriente que está en proporción a la velocidad del movimiento. No necesitan contacto con los dispositivos, gracias a su sistema magnético en conjunto con una rueda dentada, permite la medición de movimientos rotatorios.

En el anexo se detalla una lista con el equipamiento tecnológico necesario para medir los parámetros de la aeronave en el laboratorio.

3.1.2. Medidas no invasivas

3.1.2.1. Sistema de posicionamiento basado en equipo de cámaras

Para medir parámetros como son la estabilidad y la precisión de la trayectoria del UAV, se ha escogido un sistema de medida del posicionamiento en

interiores basado en una red de cámaras que analizan la trayectoria de la aeronave en las tres dimensiones. Estos datos son transmitidos y procesados en la unidad central, pudiendo finalmente medir multitud de parámetros, por ejemplo, tal y como se explicará en la sección de perturbaciones, la estabilidad en la trayectoria y el margen de error que se comente en la precisión de ésta cuando afectan fenómenos como el viento.

Este tipo de sistemas se encuentran implementados actualmente en instalaciones como es el caso del CATEC (Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales), que cuenta con una red de 20 cámaras VICON. Con este sistema se puede calcular en tiempo real con hasta 500 Hz de tasa de refresco, la posición y la actitud de cualquier objeto móvil que se encuentre en un volumen de 15x15x5 m.

Además se integra con un sistema de desarrollo software que permite la simulación de los algoritmos antes de probarlos en el banco de pruebas.

Con este sistema se podrían analizar todos los factores derivados de la estabilidad y la trayectoria de la aeronave.

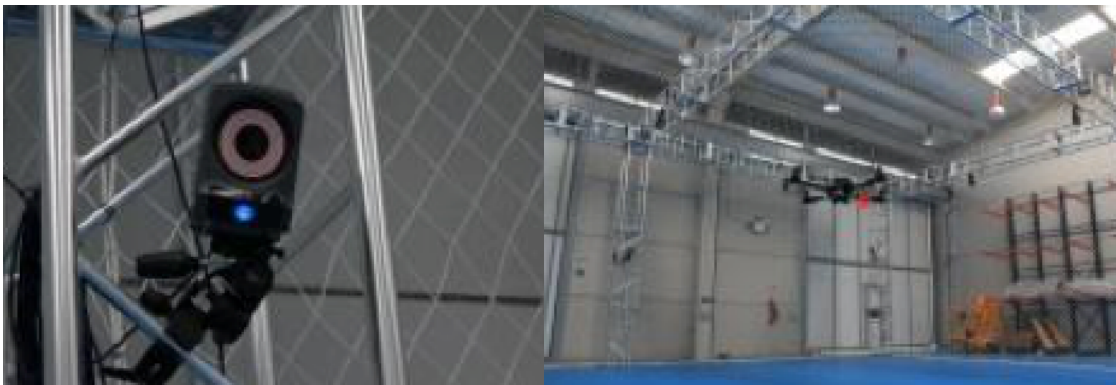


Fig. 3.2 Sistema de posicionamiento utilizado en CATEC

3.1.2.2. Sistema giroestabilizado

Además del sistema de posicionamiento, se puede disponer de un sistema auxiliar de redundancia, consiguiendo mayor exactitud. En CATEC cuentan con un sistema basado en una cámara visual, una cámara termográfica y un láser para medir la distancia al punto que se está observando.

Este sistema podría ser considerado también interno, como carga útil del UAV. El láser da información de distancia al punto observado, pudiendo ser utilizado para conocer por ejemplo la altura o la distancia de la aeronave a un punto referenciado.



Fig. 3.3 Sistema giroestabilizado

3.2. Equipos para la generación de perturbaciones

3.2.1. Comportamiento frente al viento

Para simular vientos de diferentes direcciones e intensidades se utilizará un ventilador industrial capaz de generar viento de diferentes intensidades y direcciones, para poder controlar las perturbaciones generadas y simular situaciones reales.



Fig. 3.4 Equipo simulador de viento

Con un estudio de simulación de viento, se podría además de estudiar el comportamiento de la aeronave, diseñar un sistema de resistencia a fuertes vientos. Se equipa al drone de sensores para obtener a priori los datos de empuje y control necesarios para una buena estabilización del UAV.

Si se provee de un sensor de intensidad en cada uno de los rotores, ya que son equidistantes, es sencillo prever que a igual intensidad y condiciones estacionarias, el drone estará totalmente estable. Sin embargo, en condiciones de viento esto no ocurre, pero al realizar pruebas in situ el piloto puede estabilizar el drone y los sensores registrarán la intensidad de cada uno de los rotores para que esto ocurra.

Con la ayuda del IMU y el sistema de cámaras, se puede conocer perfectamente la posición del drone en el espacio y así elaborar un método para operar en condiciones de perturbaciones.

3.2.2. Aspersores para simulación de lluvia

También es interesante estudiar en el laboratorio el comportamiento del drone al entrar en contacto con cantidades importantes de agua.

Se colocarán aspersores giratorios en la parte superior del laboratorio, para estudiar el comportamiento del drone al volar en estas condiciones o la permeabilidad de los materiales, al entrar en contacto con determinadas cantidades de agua.



Fig. 3.5 Equipo simulador de lluvia

CAPÍTULO 4. CONTROL Y GUIADO

Para entender el funcionamiento de un UAV, podemos diferenciar cuatro bloques principales: plataforma de vuelo, carga útil, estación de tierra y aviónica.

- Plataforma de vuelo: el propósito de la plataforma de vuelo es transportar y proteger la aviónica y la carga útil. Incluye la estructura del avión y todo el hardware necesario para mantenerla en el aire. Está formada por la estructura propia de la aeronave, los actuadores y superficies de control, la alimentación del piloto automático y el sistema de propulsión.
- El subsistema de carga útil consiste en el hardware no relacionado con la plataforma de vuelo o aviónica. La carga útil se coloca en la aeronave para lograr los objetivos del usuario.
- La estación de tierra incluye el hardware y software necesario para dar soporte a la aviónica y la carga útil en vuelo.
- La aviónica está formada por el piloto automático, receptor GPS, y un módem digital. Su propósito es controlar la aeronave y comunicarse con la estación de tierra.

En esta sección del proyecto nos centraremos en la parte de control del UAV, formada por la aviónica y la estación de tierra.

4.1. Piloto automático

El piloto automático es un sistema eléctrico y mecánico capaz de guiar una aeronave sin ayuda de un ser humano. Su objetivo es sustituir en algunas maniobras del vuelo al piloto mejorando su capacidad de respuesta.

Es capaz de realizar maniobras como mantener la altitud, ascender o descender, mantener velocidad deseada, seguir un rumbo o localización, alineación con la pista o aterrizaje automático.

En cuanto a su estructura, el piloto automático es una unidad compacta que contiene: la Unidad Central de Procesamiento, sensores para medir los estados de la aeronave, puertos de entrada/salida para dar cabida a los dispositivos de carga útil, comunicaciones GPS y componentes electrónicos para apoyar estos dispositivos.

La CPU (unidad central de procesamiento) es el corazón del piloto automático. Es responsable del tratamiento de datos de los sensores, el manejo de los puertos de entrada y salida para el GPS y el manejo de las comunicaciones con la estación de tierra.

Sobre la base de estos requisitos, la CPU debe tener puertos digitales abundantes, y suficiente memoria RAM y memoria flash para el almacenamiento del código fuente de piloto automático y la ejecución.

El piloto automático obtiene los datos para su actuación de diferentes sensores del avión y de su sistema de navegación. La CPU procesa los datos y decide como actuar en función de su configuración y sus conocimientos implícitos, enviando las señales necesarias a los mecanismos de control de la aeronave y los motores. El piloto automático es capaz de actuar sobre los 3 ejes de movimiento de la aeronave.

En cuanto a su estructura, el sistema de piloto automático se compone de tres bloques principales:

- Unidad piloto automático
- Unidad en tierra
- Software (PC)

La unidad piloto gestiona y controla el vehículo desde el despegue hasta el aterrizaje. Es capaz de seguir un plan de vuelo con puntos editables en tiempo real.

Una vez que el plan de vuelo se carga sobre el piloto automático, es independiente de las instrucciones del operador, y en caso de un fallo de comunicaciones, inicia una maniobra de regreso y aterriza con seguridad.

Gracias a su versatilidad, puede controlar cualquier carga útil a bordo del UAV como cámaras, sensores o paracaídas. Estos dispositivos pueden ser controlados tanto en tiempo real por un ordenador, como por el piloto automático.

Es recomendable disponer de dos microprocesadores en paralelo (CPU):

- CPU Mission Control: gestiona las comunicaciones con tierra, la gestión de cargas útiles y en general, las operaciones que no están relacionadas con el vuelo.
- CPU Flight Control: produce los comandos de superficies y controla la actitud de la aeronave. Este procesador accede a todos sus sensores y siempre está evaluando la posición actual, estado y el control.

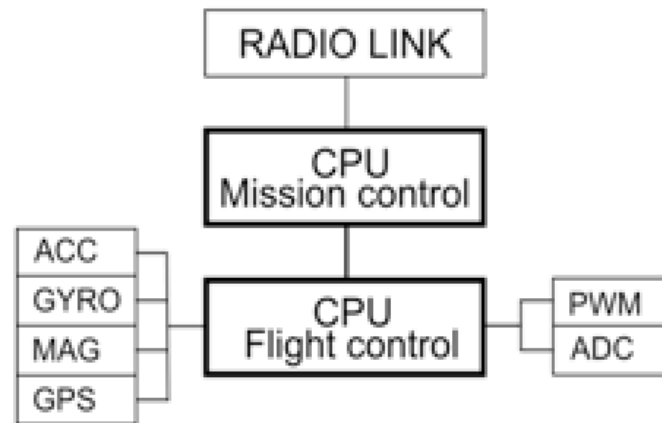


Fig. 4.1 Esquema de funcionamiento de las dos CPU

Los procesadores no gastan tiempo de manipulación en tareas de bajo nivel, ya que estas tareas se procesan en paralelo por la lógica dedicada de la FPGA, que da una completa flexibilidad en la configuración del piloto automático para comunicarse con aviónica de a bordo y los periféricos.

Una FPGA (Field Programmable Gate Array) es un dispositivo programable que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada 'in situ' mediante un lenguaje de descripción especializado.

La lógica programable puede reproducir desde funciones tan sencillas como las llevadas a cabo por una puerta lógica o un sistema combinacional hasta complejos sistemas en un chip.

Debido al hecho de que estos dos procesadores están trabajando en paralelo y no se dedican a la electrónica de procesamiento de los puertos serie y sensores, se obtiene una velocidad de control óptima.

A continuación, se analizan los datos de un piloto automático comercial, AP04 (UAV Navigation), a modo de ejemplo ya que las diferentes variantes comerciales de pilotos automáticos son similares.

Además de las funciones mencionadas de un autopiloto, el AP04 ofrece otras prestaciones como alarmas de aviso, protección contra la pérdida de enlace de radio, devolviendo el UAV a la base de tierra de forma automática, o sobrevivir a fallos de sensores, por ejemplo, en caso de pérdida de señal GPS, navegar en modo inercial.

En la tabla 3 se adjuntan algunas de las especificaciones del autopiloto mencionado, AP04.

COMUNICACIONES	
Rango de frecuencia Datalink	902-928 MHz
Baud rate	115.2 Kb/s (full duplex)
Rango	100 km
Método	Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)
Multi-UAV volando simultáneamente	16 UAVs
I/O	
I/O líneas	16
PWM rate	50Hz or 200Hz
PWM señal	1 ms a 2 ms high, 1us steps
Puertos RS232 baud rate	4.8k, 9.6k, 19.2k, 38.4k
REDUNDANCIA Y SEGURIDAD	
Dual Flight Control CPU	Si
Diagnósticos Online de sensores	Si (Continuous Built-In Test, CBIT)
AIR DATA SYSTEM (ADS)	
Altimetro	0 a 20,000 pies
Accelerómetro	3 ejes
Aceleración máxima	10G (vertical)
Sensores angulares	3 ejes
Max ratio angular	300°/s
GPS	
Canales	12
Diferencial	Compatible
ELECTRICAS	
Alimentación	9 a 36 V DC
Consumo	2.5 W

Tabla 3 Especificaciones de piloto automático tipo

4.2 Sistemas de geoposicionamiento

En las aplicaciones UAV, el sistema comúnmente utilizado es el basado en los sistemas de navegación por satélite (GNSS) como el GPS, el Glonass, o los sistemas de aumentación como el sistema europeo EGNOS.

Sin embargo, se pueden utilizar métodos alternativos, en el caso de que no estuviesen disponibles estos sistemas de navegación, como ocurre en interiores de edificios, túneles u otras situaciones con escasa cobertura radioeléctrica. Este puede ser el caso de nuestro laboratorio, si en una fase

más avanzada se edifica. A continuación, se resumen varias tecnologías de posicionamiento indoor, realizando una comparativa entre ellas con el objetivo de encontrar la óptima para nuestras necesidades en el laboratorio:

4.2.1. Sistemas inalámbricos

Los sistemas inalámbricos se basan en la aplicación de técnicas de triangularización sobre ondas electromagnéticas para obtener la localización del dispositivo. Se envían señales entre sensores estáticos (emisores) y el objeto a ser localizado (receptor).

La posición del receptor se determina con respecto a los emisores, ya que la posición de los emisores es conocida de antemano. Por lo tanto, son necesarias dos herramientas diferentes para usar estos sistemas:

1. Un receptor de señal inalámbrica ubicado en el objeto en movimiento
2. Sensores estáticos instalados en diferentes partes del edificio.

Dependiendo de la frecuencia de las ondas electromagnéticas, estas tecnologías se clasifican en: infrarrojos y radio frecuencia (RFID, Wi-fi, Bluetooth, UWB),. También pueden utilizarse para esta finalidad dispositivos de ultrasonidos.

La ventaja de los sistemas inalámbricos es que son relativamente fáciles de implementar. Por el contrario, el inconveniente es que precisan de una infraestructura de sensores montada en el edificio y de receptores con hardware específico.

4.2.2. Sistema de navegación inercial

Los sistemas de navegación inercial (INS) surgen para evitar la dependencia de la infraestructura y de los sensores específicos que tienen los sistemas de posicionamiento con tecnologías inalámbricas. Los INS usan sensores inerciales como acelerómetros, giroscopios y brújulas para determinar la distancia recorrida y la orientación de movimiento del objeto y así obtener el movimiento del usuario.

La gran ventaja de los INS es que no precisan de referencias externas para conocer el movimiento del usuario, así son totalmente independientes del entorno. Esto permite que estos sistemas puedan posicionar al usuario sólo con el dispositivo sin necesidad de ninguna infraestructura externa, lo que ofrece la posibilidad de usar este sistema en cualquier entorno indoor.

Para este sistema serían necesarios elementos como el acelerómetro y giróscopo combinados con cámaras y tecnología láser para realizar un

seguimiento de los movimientos realizados por el UAV en el espacio y detectar la posición, distancia y superficie de obstáculos.

4.2.3. Campo magnético

Además de los sistemas de posicionamiento basados en tecnologías inalámbricas y los INS, recientemente ha aparecido un estudio llamado IndoorAtlas4 que usa el valor del campo magnético para conocer la localización del usuario, de la misma forma que lo hacen algunas especies de aves. El estudio propone usar la brújula de los dispositivos para medir el módulo del campo magnético de una zona en particular.

El proceso consiste en:

1. Hacer un mapeo de la zona, midiendo el valor del campo magnético en diferentes puntos
2. Una vez mapeada la zona con los valores del campo, cuando el usuario se mueve por la zona se comparan los valores del campo magnético que obtiene el dispositivo con los valores almacenados del mapeo y se puede saber la localización del usuario, ya que teóricamente el valor del campo magnético es constante en cada punto.

La principal ventaja de este sistema de ubicación es que tampoco necesita infraestructura de sensores en el edificio, aunque precisa de una toma de datos previa antes de posicionar al usuario.

El principal inconveniente de usar los valores del campo magnético es que el sistema es vulnerable a cambios del entorno en tiempo real, como los cambios en el campo magnético local debidos a aparatos electrónicos como televisores, monitores, altavoces, e incluso los propios dispositivos móviles. Tampoco sería útil en espacios indoor que están en movimiento, como por ejemplo un crucero, ya que el campo magnético terrestre varía de un punto a otro. Por otro lado, todavía no existen datos concluyentes sobre su fiabilidad y precisión, ya que el sistema IndoorAtlas no se ha abierto al público.

4.2.4. Método óptimo: trilateración

Tras realizar la comparativa, creemos que el sistema que mejor se adapta a nuestras necesidades es el siguiente, basado en el método de trilateración, ya que aunque haya la necesidad de una infraestructura, hoy en día es lo que ofrece más fiabilidad y precisión, pudiendo ser contrastado con los sensores inerciales internos del dron, que serán comentados en el capítulo 3:

En el método de la trilateración, hay tres técnicas que tienden a ser utilizadas para medir la distancia radial entre un nodo móvil y cada punto de referencia,

utilizando: el índice de intensidad de la señal recibida (RSSI), el tiempo de llegada (TOA) y la diferencia de tiempo de llegada (TDOA).

El método RSSI no es adecuado para nuestra aplicación, ya que la exactitud de localización es baja (del orden de metros). Mientras, los sistemas que utilizan métodos de TOA y TDOA pueden lograr una precisión de unos pocos centímetros. El principio común de estos métodos es el tiempo de vuelo (TOF) la medición de una onda acústica o electromagnética para deducir la distancia entre dos dispositivos.

La medición TOF de una onda electromagnética que se desplaza a la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) requiere un instrumento electrónico de alta precisión que opere en alta frecuencia con el fin de lograr una buena resolución, lo que implica un alto coste. Por tanto como solución se propone el estudio de sistemas de bajo coste, que explotan la propagación de una onda ultrasónica que se desplaza mucho más lento que una onda electromagnética (aproximadamente 1 millón de veces).

El sistema utiliza marcadores o beacons. Un beacon es un dispositivo diseñado para emitir continuamente una señal Wi-Fi y un identificador único para poder trabajar como baliza. Su rango de trabajo es de hasta 100 metros, suficiente para las necesidades del laboratorio, su tamaño es similar al de una moneda y se alimenta mediante baterías que proporcionan una autonomía de varios años de uso.

4.2.4.1. Funcionamiento

El sistema tiene dos funcionalidades principales: estimar la posición y calcular los movimientos del dron.

1. Recogida de datos:

Etapa 1: El telémetro equipado en el dron envía un mensaje de radio y un impulso ultrasónico al mismo tiempo cada 256 ms (método TDoA).

La velocidad de las señales de radio es de aproximadamente 3×10^8 m/s, mientras que la velocidad del sonido a través del aire es aproximadamente $3,4 \times 10^2$ m/s. Así pues, el tiempo de propagación de señales de radio es mucho mayor que el tiempo de propagación de ultrasonidos, los TOF de la onda de RF pueden ser considerados como instantáneos.

El uso de la señal de RF da el tiempo de referencia con el fin de medir la TOF de los impulsos ultrasónicos.

Etapa 2: Los Beacons reciben el mensaje de radio e inician un temporizador que mide el TOF del impulso ultrasónico. Cuando el pulso de ultrasonidos alcanza un beacon, se genera una interrupción con el fin de calcular el TOF.

Etapa 3: Los datos TOF recibidos por cada baliza se envían a través de la red de Ethernet, a la unidad local (terminal de proceso).

Etapa 4: Utilizando una aplicación en tiempo real en la unidad local, se calcula la posición del telémetro utilizando un método de trilateración. Cada posición se registra en una base de datos y a partir de estos datos, el software calcula los movimientos del usuario: velocidad de la marcha, la distancia recorrida y las trayectorias.

Si los beacons se colocan adecuadamente, sólo se necesitan tres conjuntos de mediciones de distancias para encontrar la posición 3D del nodo móvil, en nuestro caso el dron. Mediante el método de trilateración, con tres beacons colocados en el techo obtendríamos tres esferas con dos soluciones. Como los beacons están fijados a la parte superior del laboratorio, una de las soluciones se encuentra por encima del techo, mientras que la otra solución se encuentra debajo de ella. La primera se puede descartar porque ultrasónica no pasa por las paredes.

La figura 4.2 muestra tres puntos beacon (B1, B2 y B3) que actúan como puntos de referencia en un sistema coordinado conocido. El nodo móvil (telémetro T1) transmite RF y señales ultrasónicas y todas las balizas pueden determinar sus propias distancias respecto a la posición telémetro midiendo la TOF de la señal. La medición de la distancia se realiza mediante la estimación de la distancia entre el telémetro y las balizas dentro del área de cobertura bajo el techo.

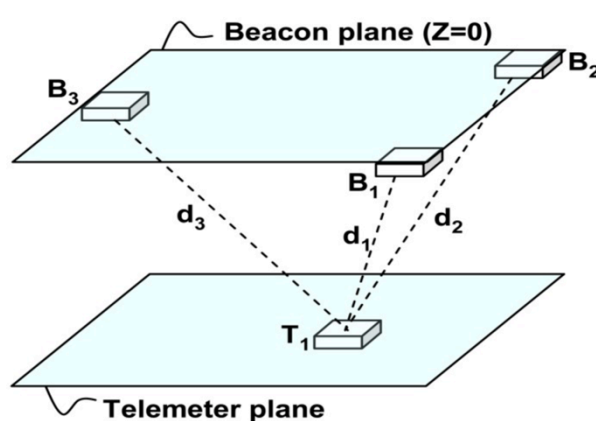


Fig. 4.2 Esquema de marcadores en el método de trilateración

4.2.4.2. Hardware

Dos partes separadas en dos placas específicas conectadas a través de dedicated Programmable Input/Output (PIO). La primera placa contiene la unidad de microprocesador (MPU) y un módem de radio, mientras que la segunda placa está dedicada a los pulsos de emisión / recepción de ultrasonidos.

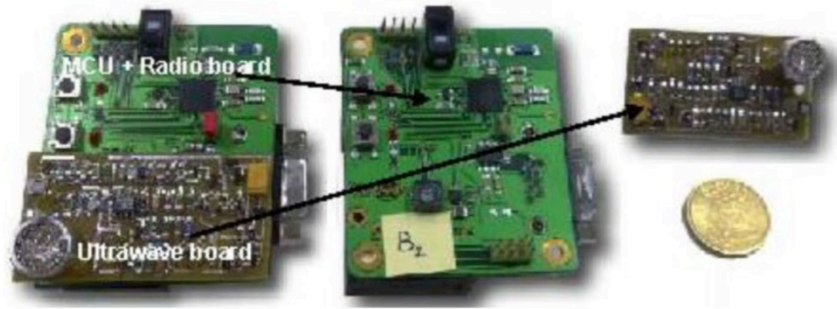


Fig. 4.3 Placas MPU/radio y ultrasonidos

Los datos recibidos por el Beacon se envían a la unidad local a través de una tarjeta Ethernet configurada en TCP / IP. Esta placa también cuenta con un transceptor inalámbrico RF 802.15.4.

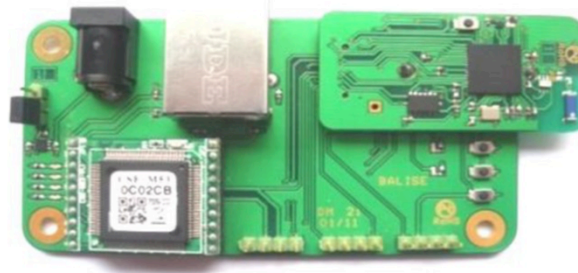


Fig. 4.4. Placa Ethernet

4.3. Estación de tierra

La estación de tierra que permite la comunicación e interacción entre el piloto y la aeronave, se podría considerar como la interfaz de uso entre el piloto y el resto del sistema. Además de actuar como retransmisión de datos, la estación tierra proporciona información útil al piloto automático tales como posición y presión.

La comunicación incluye un canal unidireccional de vídeo/audio para transmitir la información desde la aeronave a tierra y un canal bidireccional de datos entre los nodos estación de Tierra y UAV.

La estación de tierra se compone de diferentes elementos, a continuación se definen los tres elementos básicos, y se proponen otros opcionales de mejora detallados a lo largo de esta sección:

Los elementos básicos son:

- Sistema de comunicación entre el avión y la estación tierra
- Un equipo de recepción y visualización de vídeo/audio
- Equipo de control de mando

Con la finalidad de crear interferencias que afecten al UAV en su control, hemos de conocer el tipo de comunicación y las frecuencias a las que opera.

4.3.1. Sistema de comunicación entre el avión y la estación tierra

El sistema de comunicación entre el avión y la estación tierra permite la transmisión y recepción de datos, con comunicaciones bidireccionales entre la estación de tierra y el piloto automático y dispone de receptor GPS y punto de conexión en el sistema para el equipo de control de mando, con el objetivo de permitir la anulación manual por un piloto externo si es necesario. Está equipado con puertos Ethernet y conectores para el seguimiento de la antena, la antena GPS y el equipo de control de mando.

Los receptores con salto de frecuencia (FHSS), necesitan enlazarse con el emisor. Cada receptor y emisor llevan grabadas una dirección IP única de fabrica que se utilizan para enlazar los equipos.

Como hemos comentado, los enlaces son bidireccionales (Receptor y Emisor al mismo tiempo). Están preparados para recibir control proporcional, datos y transmitir telemetría y datos a la estación base.

La banda RF que utilizan es la ICM (Industrial Científica y Medica) (ISM en ingles) no requiere licencia de uso. Hay varias bandas principales disponibles debido a las distintas normativas empleadas en cada país, básicamente en todo el mundo hay 3 regiones y tres bandas ISM en la zona de 866 a 960 MHz, según la ITU Unión General de Telecomunicaciones.

A Europa le corresponde la banda ISM 868 MHz (Europa, África, Asia, Oceanía): Frecuencias: de 868 a 870 MHz.

- LRS (Long Range System): 20 canales disponibles con una separación de 100 kHz.
- XLRS (Extended Long Range System) : 40 canales separación 50 kHz.

Para enlazar un receptor LRS, necesita que se configure el canal de RF y la dirección IP (en la LEA o Lista de Equipos Autorizados) en la banda ISM seleccionada.

En Europa, en XLRS sólo se deben usar canales 28 a 34 (frecuencias 869.4 a 869.7 MHz) con sistemas de 500 mW y para FHSS o canal fijo. Si se usan

otros canales, se debe bajar la potencia a 25 mW y bajar la latencia.

En LRS hay que tener en cuenta que el canal 0 esta reservado para identificación de los equipos y el canal 20 para las radiobalizas de localización.

Los canales 6 al 15 en la banda ISM 869 MHz se utilizarán para salto de frecuencia FHSS y potencia de hasta 500 mW.

Estas frecuencias permiten utilizar antenas de pequeño tamaño, aceptables para un UAV y siendo muy eficientes al mismo tiempo, además la banda ICM 869-915 MHz, no está saturada como la de 2.4 GHz y permite una gran fiabilidad de uso. La modulación es FSSH o canal fijo con modulación GFSK, (FSK Gaussiana), con balanceo de bits y recuperación de errores en tiempo real.

La modulación por desplazamiento de frecuencia o FSK, del inglés *Frequency Shift Keying*, es una técnica de modulación para la transmisión digital de información utilizando dos o más frecuencias diferentes para cada símbolo. La señal moduladora solo varía entre dos valores de tensión discretos formando un tren de pulsos donde uno representa un "1" o "marca" y el otro representa el "0" o "espacio".

En cuanto al direccionamiento, es similar a una IP de Internet Protocol. Cada Receptor y emisor disponen de una dirección IP única que viene grabada de fábrica. Un receptor se puede enlazar a un solo emisor filtrando su dirección IP o a varios si están incluidos en la lista de equipos autorizados interna. Para la comunicación de datos se sigue el Proctolo Unibus11WRC.

4.3.2. Equipo de control de mando

Emisora RC que posee sticks e interruptores, genera señales PPM a partir de éstos para controlar la aeronave.

A continuación se muestran los controles típicos y las especificaciones de control de un equipo de mando de UAV Navigation, siendo todas las opciones comerciales muy similares.

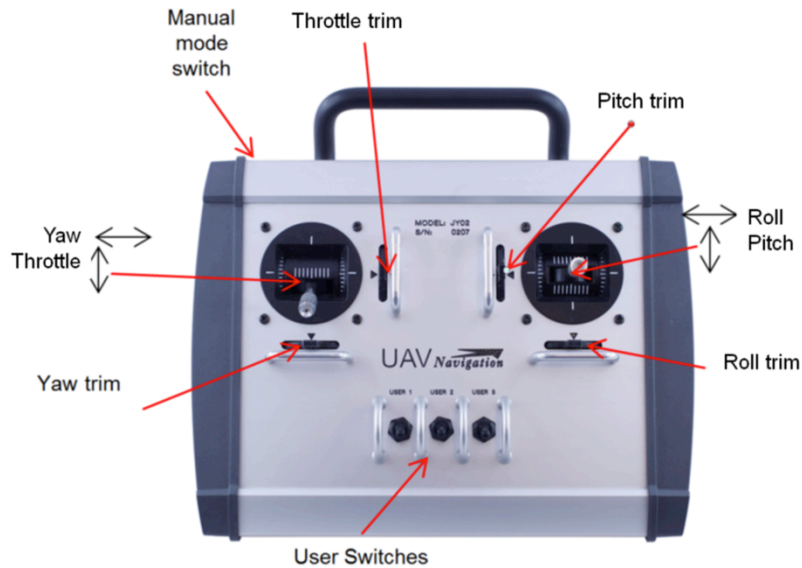


Fig 4.5 Equipo de control

Canal RF fijo	0 a 20 en 868-870MHz 0 a 100 en 902-928MHz
Banda ISM. 869 ó 915MHz. (Solo sistemas sin filtro RF)	0=868-869MHz 1=902-928MHz
Salto de frecuencia.	Implementado a partir de V:2.52
Corrección errores en RF	0=OFF, 1=ON. 1 por defecto en <V:2.51
Potencia transmisión RF	0 a 10
Nivel detección portadora RF (Rssi)	0 a 130. Desactivado y por defecto = 255.
RF (radio)	
Envia Transmision sin datos para test	portadora RF sin modular durante 300mseg
Devuelve valor portadora RF (Rssi) y del ult. SMS	-1dBm a -118dBm
Analiza espectro RF. Un solo barrido, según config.	Preliminar

Tabla 4 Especificaciones típicas de un equipo de control

4.3.3. Equipo de recepción y visualización de vídeo/audio.

Junto con un software, el operador UAV puede monitorear el estado actual del vehículo (posición, altura, velocidad, nivel de batería,...) controlar el UAV o modificar la misión del vehículo en tiempo real, gracias a un PC equipado.

Un ejemplo de software ampliamente utilizado es Mission Planner, que se puede utilizar como una utilidad de configuración o como un suplemento para el control dinámico del UAV.

4.3.4 Concepto del sistema completo

A continuación se proponen algunos elementos opcionales o mejoras para la estación de tierra:

- Un display mostrando información del vuelo en tiempo real. Esta información puede insertarse en el canal de vídeo con un OSD.
- Un equipo de control avanzado. Por ejemplo un PC portátil que permita, por un lado, mostrar información sobre el vuelo, y por otro lado configurar y comandar el avión.
- Una antena auto orientable basándose en la posición del avión.

La siguiente imagen muestra el sistema que consta de piloto automático instalado en una aeronave conectado a la estación tierra a través de un enlace de radio.

La unidad tierra tiene su propio enlace de radio para comunicarse con el piloto automático y un puerto RS-232 para retransmitir los datos y comandos entre un el software del PC y el piloto automático.

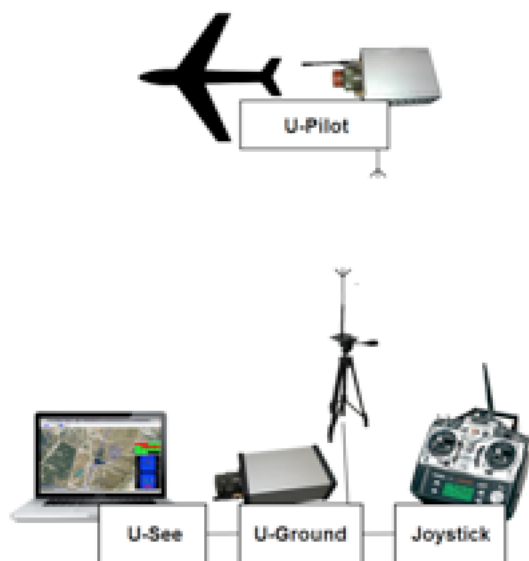


Fig 4.6 Concepto del sistema

4.4. Ensayo a realizar en el laboratorio

Como ensayo en el laboratorio, se podrían crear interferencias que interfieran la señal del piloto automático, estudiar a que rango y frecuencia se queda sin cobertura y que mecanismos tiene para este tipo de situaciones, por ejemplo los autopilotos estudiados (UAV Navigation) tienen un sistema de aterrizaje seguro en base cuando pierden la cobertura.

La creación de interferencias se pueda realizar mediante la utilización de inhibidores de frecuencia que pueden ser de varios tipos:

- a) De banda estrecha, consistentes en la generación de una o varias portadoras en la banda de frecuencias utilizada por el sistema de radiocontrol.
- b) De banda ancha, consistente en la generación de una señal de gran ancho banda que cubra diversas bandas de frecuencia.

En el primer caso, el sistema consiste en la utilización de ruido blanco para modular en amplitud o frecuencia una o varias portadoras en la banda de frecuencias de interés, para convenientemente amplificadas, generar una señal de gran potencia y ancho de banda que enmascare a las señales de radiocontrol o las procedentes de los sistemas GNSS. Habitualmente el ruido blanco se genera al polarizar un diodo en directa, amplificando y filtrando el ruido generado.

En el segundo caso, los sistemas consisten en la utilización de varios osciladores de frecuencia variable que realizan barridos rápidos de frecuencia en anchos de banda contiguos, que convenientemente amplificados en potencia generan una señal que presenta un espectro de gran ancho de banda y potencia elevada, capaz de interferir de forma simultánea diversos servicios de telecomunicación.

En el laboratorio, se propone la utilización de un generador que inhiba la recepción de las señales GPS y de radiocontrol para observar el comportamiento y evolución del drone ante la pérdida de estas señales y poder comprobar el funcionamiento de los mecanismos de seguridad y de aterrizaje seguro o de retorno al punto de partida, para evitar inconvenientes como daños en la estructura de la aeronave y en su carga útil. La utilización de este tipo de inhibidores requerirá la preceptiva autorización de las autoridades gubernamentales.

CAPÍTULO 5. CARGA ÚTIL

Para concluir el proyecto, se presenta el último capítulo en el cual se analizan diferentes aplicaciones de cargas útiles en los UAVs.

Nos centraremos en diferentes tipos de cargas útiles, que utilizan tecnologías como cámaras visibles, de infrarrojos, multiespectrales, radar de apertura sintética, sensores de contaminación, LIDAR y tecnología láser. Finalmente se propondrán ensayos a realizar en el laboratorio de drones destinados a dichas aplicaciones.

5.1. Aplicaciones

5.1.1. Control de calidad del aire

La calidad del aire y su control ha sido y es, desde hace mucho tiempo, una preocupación constante debido a los efectos dañinos que producen los contaminantes atmosféricos tanto en la salud de las personas como en el desarrollo del planeta.

Según como se producen estos procesos contaminantes podemos distinguir entre los impactos episódicos, ligados por ejemplo a accidentes, y aquella contaminación que está ligada a fuentes fijas que emiten de manera continuada. En el caso de la contaminación producida de manera continua y cuyo principal foco es en el momento actual las emisiones automovilísticas, presentan unos contaminantes muy específicos cuyos niveles máximos permitidos de concentración en el aire están regulados por ley.

Sin duda alguna en cualquier de estos dos problemas ambientales el uso de vehículos UAVs tienen una gran aplicación práctica que en principio podría sustituir a la observación tradicional que ya se realiza mediante globos, debido a sus mejores prestaciones.

El control de la calidad del aire mediante el uso de UAVs consiste en la capacidad de instalar en un dron instrumentos de medida de la contaminación atmosférica, obtener los datos y tratarlos para extraer resultados.

Los automóviles emiten óxidos de nitrógeno y partículas de humo negro. Los óxidos de nitrógeno generan ozono mediante una reacción fotoquímica. Este ozono nada tiene que ver con el ozono producido en la estratosfera por acción de la radiación ultravioleta y que protege de efectos dañinos de dicha radiación. El ozono es un gas de efecto invernadero que tiene además un carácter oxidante que afecta a los pulmones y a la vegetación.

Con este objetivo, se utilizan sensores electrónicos de medida de la concentración de gases. Estos dispositivos de tamaño reducido se pueden acoplar directamente al dron permitiendo así la medida digital de la

contaminación atmosférica.

La medida que realizan este tipo de sensores se basa en determinar la corriente que se establece entre dos electrodos cuando el gas a medir reacciona con el electrodo de trabajo.

Estos dispositivos contienen una membrana porosa que permite al gas difundirse en el interior de su celda. Cuando el gas entra en contacto con el electrodo sensible se crea una corriente eléctrica entre el ánodo y el cátodo que hace variar la diferencia de potencial entre ambos. Esta variación de la señal eléctrica se mide y amplifica siendo proporcional a la concentración de gas presente.

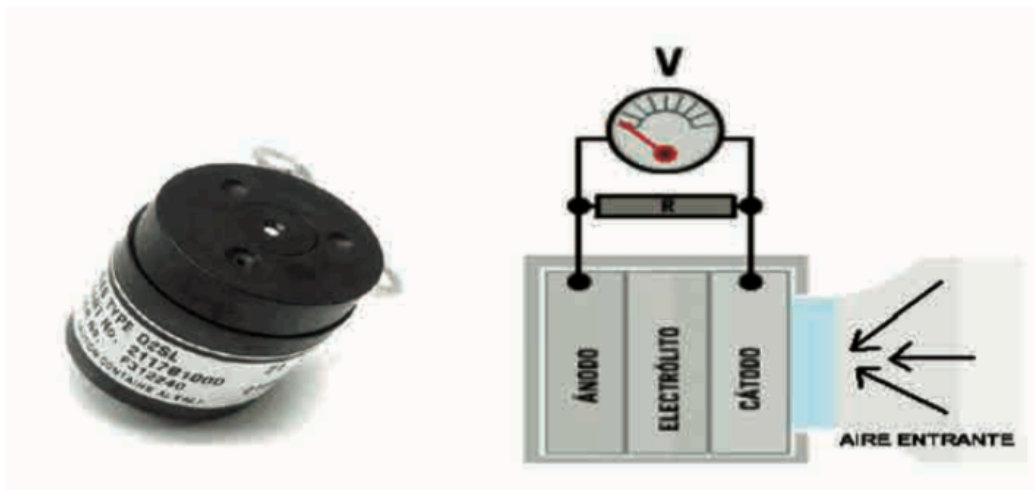


Fig. 5.1 Sensor de contaminación atmosférica

Actualmente, la empresa Airestudio y la universidad del País Vasco están colaborando para desarrollar una tecnología que mida la contaminación atmosférica basada en UAVs. Además del nivel de contaminación atmosférica, el prototipo realiza medidas de presión, temperatura y humedad y lleva incorporado un receptor GPS y una tarjeta SD para geolocalizar y archivar los datos.

A continuación se presenta una imagen de los resultados de las pruebas llevadas a cabo con un primer prototipo del sensor, donde se observa de manera geolocalizada el nivel de contaminación por emisiones de gases efecto invernadero.



Fig. 5.2 Resultados de diferentes niveles de contaminación obtenidos por el sensor de contaminación atmosférica

Otro ejemplo de los datos adquiridos por este tipo de sensores, puede ser el siguiente gráfico, realizado en el Pirineo en Julio 2012 y que muestra la cantidad de ozono en el aire con respecto a la altitud del terreno.

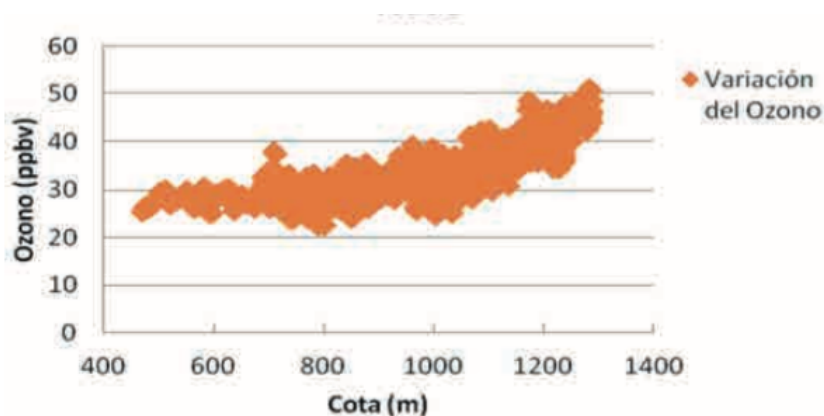


Fig. 5.3 Resultados de cantidad de ozono vs altitud en el ambiente obtenidos por el sensor de contaminación atmosférica

Tanto en el caso anterior como en este último los resultados no están calibrados y es preciso recordar que este tipo de sensores electrónicos necesitan ser calibrados para poder validar sus medidas y su rango de error.

Así pues, se precisa de un espacio equipado para realizar la preparación y calibración de los equipos de medida.

En el laboratorio de drones, se podrían emitir cantidades controladas de diferentes gases contaminantes y calibrar las lecturas obtenidas por los sensores del drone, como se explicará en el apartado de ensayos a realizar en el laboratorio.

5.1.2. Aplicaciones cartográficas

Una herramienta básica para elaborar la cartografía es la fotogrametría. Esta permite medir sobre fotografías con las que se puede determinar las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. Básicamente es una técnica de medición de coordenadas tridimensionales que utiliza fotografías junto a puntos de referencia topográficos situados en el terreno como medio para la medición. Los puntos de referencia se colocan en el terreno para corregir los posibles errores cometidos mediante el sistema GPS, ya que esta aplicación requiere de una gran precisión.

Una vez recogidos los datos se exportan a un software especializado que realiza procesamientos fotogramétricos de los que se obtiene una nube de puntos con coordenadas x, y, z, un modelo digital del terreno y composición de una ortoimagen georeferenciada.



Fig. 5.4 Nube de puntos y ortoimagen

Una de las características que más ha evolucionado en los últimos tiempos en los modelos digitales de terreno es la posibilidad de realizar modelos 3D interactivos que permiten interactuar con el terreno, como es el caso de Google Earth. Mediante los datos obtenidos por el drone, se obtienen planos con datos como curvas de nivel, con los cuales se pueden realizar este tipo de funciones.

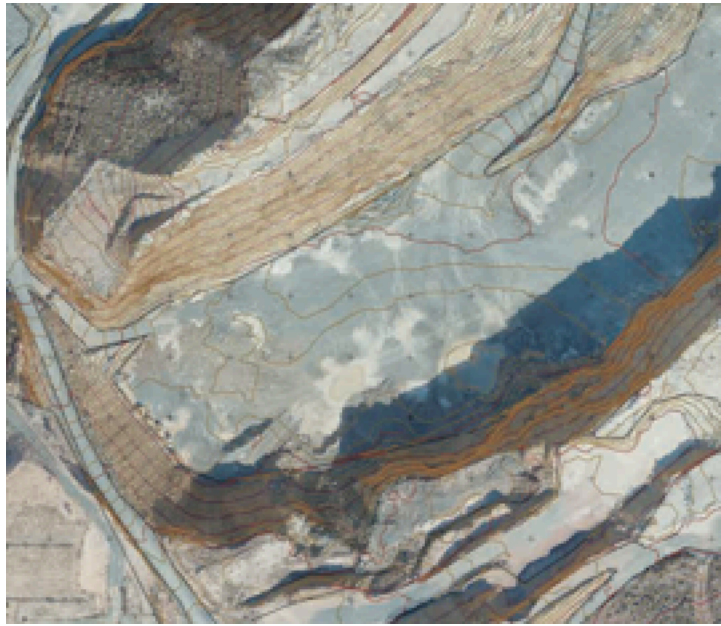


Fig. 5.5 Composición cartográfica por capas 3D

Las aplicaciones de drones para cartografía son muchas, tales como conocimiento del medio ambiente, agricultura, actividades industriales o urbanismo.

5.1.3. Aplicaciones topográficas

Los requerimientos de información topográfica en las distintas fases de ingeniería, fases conceptuales básicas y constructivas, de los proyectos mineros, tienen soluciones varias como vuelos LIDAR.

El sistema láser aerotransportado LIDAR (*Light Detection and Ranging*), consiste en usar un par transmisor-receptor de pulsos láser para hacer un barrido de la superficie del terreno y así registrar la topografía del área bajo estudio.

El LIDAR se equipa en el drone, cuya trayectoria esta vinculada a una red de estaciones terrestres dotadas de GPS ubicadas en puntos de coordenadas conocidas, para ganar exactitud. La alta densidad de puntos que se pueden medir con este sistema junto a la elevada resolución que ofrece, lo convierten en el método con mejores prestaciones.

La imagen 5.6 muestra la imagen de una explotación minera obtenida con el sistema láser LIDAR.

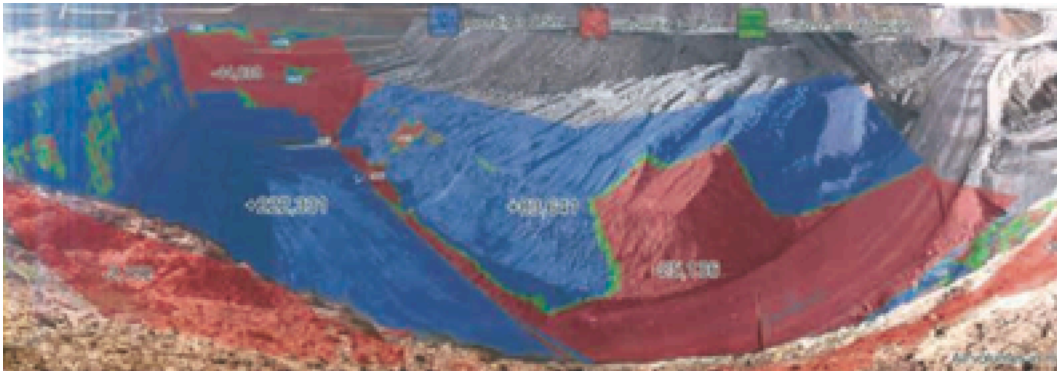


Fig. 5.6 Imagen en 3D de una explotación a cielo abierto obtenida con un sistema LIDAR

A diferencia de los métodos convencionales, la información obtenida no depende de fotografías, por ello no se ve afectada por pendientes abruptas o muy suaves, contrastes de luz y demás factores. El procesamiento de la información permite generar planos a distintas escalas, georeferenciación en distintos sistemas de coordenadas, curvas de nivel, planimetrías, delineación de estructuras y construcciones, etc.

Un Radar de Apertura Sintética (SAR) es un sensor activo que permite generar imágenes en la zona que ilumina. Por ser activo no necesita otras fuentes de iluminación como es el caso de los sensores ópticos, tratándose por lo tanto de un sensor que opera día y noche. Por otro lado, las señales que utilizan estos radares se encuentran en la banda del espectro electromagnético de las microondas, las señales a estas frecuencias no se ven afectadas por las condiciones de humedad y cobertura nubosa de la atmósfera, por lo tanto nubes y lluvia son transparentes.

Para conseguirlo, se basan en la captación coherente de los ecos reflejados por los blancos en los distintos puntos equiespaciados de la trayectoria de un avión. El radar detectará coherentemente en cada punto la componente en fase y cuadratura de la señal reflejada, y la almacenará en memoria. Suponiendo que el blanco es iluminado por la antena a lo largo de un número determinado de pulsos durante la trayectoria del avión, podemos combinar la información almacenada en esos pulsos para conseguir mejorar la resolución del sistema.

Combinando la información recogida por el radar en varios puntos se consigue alta resolución acimutal. La geometría debe ser respetada por completo para conseguir los resultados esperados, esto quiere decir que la transmisión y recepción de cada pulso debe efectuarse en un momento y posición precisos. Si añadimos que estos radares van a bordo de aviones, es intuitivo pensar que el avión debería seguir una trayectoria ideal a velocidad constante para respetar esa geometría. Esto por supuesto no es una hipótesis real, pues los aviones más estables presentan desviaciones respecto a su plan de vuelo del

orden de metros, siendo mucho mayores que la longitud de onda, y por lo tanto intolerables.

Por ello, se dispone de un software para la obtención de los resultados, que son imágenes bidimensionales, las cuales hay que revisar y hacer tareas como compensación de movimiento, funciones de calibración para la corrección del patrón de antena o funciones para la georreferenciación directa de la imagen.

Debido a la gran velocidad de desplazamiento del vehículo aéreo, la antena del dispositivo SAR se convierte en una antena virtual de mayor tamaño. El blanco permanece en el haz de la antena durante unos instantes y está observado por el radar desde numerosos puntos a lo largo de la trayectoria de satélite, lo que es equivalente a prolongar la longitud real de la antena.

Como ejemplo de resultados obtenidos por un SAR se propone esta imagen de radar adquirida por el radar SIR-C / X-SAR a bordo del transbordador espacial Endeavour, que muestra el volcán Teide. La ciudad de Santa Cruz de Tenerife es visible como morado y blanco en el borde inferior derecho de la isla. Los flujos de lava en el cráter de la cumbre aparecen en tonos de verde y marrón, mientras que las zonas de vegetación aparecen como áreas de púrpura, verde y amarillo en los flancos del volcán.

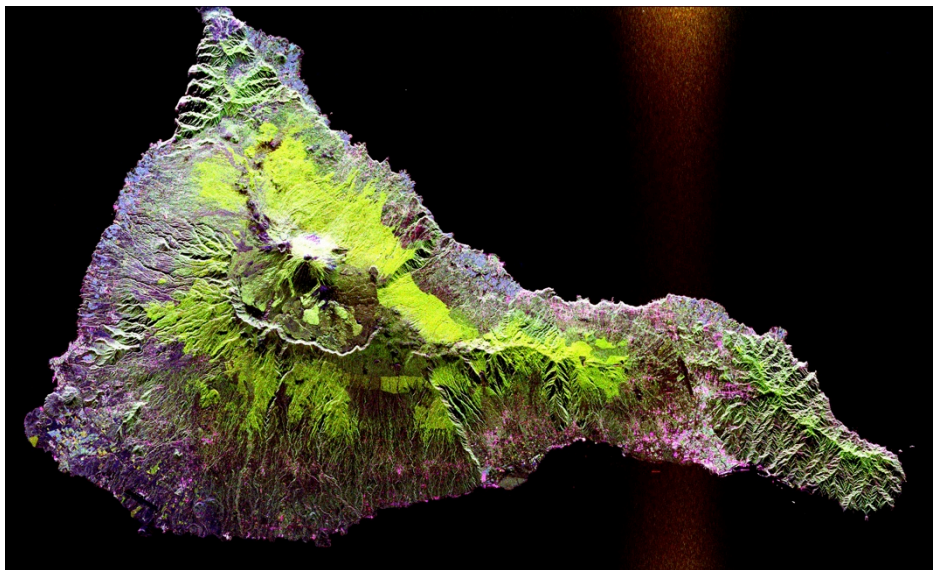


Fig. 5.7 Imagen de la isla de Tenerife tomada por un SAR a bordo del transbordador espacial Endeavour

5.1.4. Magnetometría aérea

El campo magnético de la tierra puede ser alterado por la presencia de materiales magnetizables que se encuentren cerca de la superficie del terreno, como la magnetita, asociada a yacimientos de hierro.

El método geofísico es el más empleado, método que si se realiza con un drone, supondría un menor tiempo de ejecución y una reducción de coste.

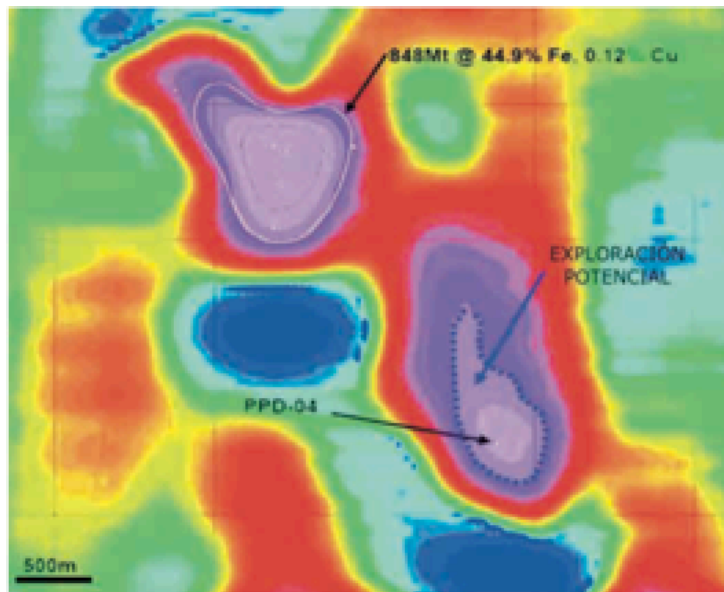


Fig. 5.8 Resultados obtenidos de un yacimiento polimetálico por medio de magnetometría aérea (Perú)

Este método de medición tiene un hándicap, se ve afectado por otros factores como las mareas lunares, tormentas solares y fenómenos meteorológicos, por tanto junto a las mediciones de campo se requiere una medición simultánea del campo magnético en un punto fijo denominado estación base que irá registrando las variaciones del magnetismo terrestre mientras se obtienen los datos.

Después de realizar estas compensaciones se obtiene un mapa estratégico del sector cuyas anomalías serán posibles zonas de yacimientos.

5.1.5. Aplicaciones en agricultura

La agricultura de precisión es un concepto agronómico que consiste en el manejo diferenciado de los cultivos a partir del conocimiento de la variabilidad existente en una explotación agrícola. Para ello se requiere de sistemas de posicionamiento global, GPS, sensores e imágenes multiespectrales obtenidas a partir de los UAVs.

Los datos captados por todos estos sensores se almacenan digitalmente en forma de tablas y mapas, a partir de los cuales se genera la información que ayuda al agricultor en la toma de decisiones.

El objetivo de la agricultura de precisión es la obtención de mayores rendimientos económicos, medioambientales y sociales, aumentando la competitividad a través de una mayor eficiencia en las prácticas agrícolas.

La gran ventaja de esta aplicación es la de facilitar a los agricultores la capacidad de observar su explotación desde el aire, no sólo en el rango del espectro visible, sino que puede utilizarse también en el rango del infrarrojo, mediante cámaras multiespectrales, que permite una mejor caracterización de la explotación.

La figura 5.9 muestra una imagen multiespectral en infrarrojo de una explotación vitícola, donde la realidad en rangos del espectro más allá de la región visible nos permite captar la variabilidad que existe en la explotación y determinar métodos para solucionarlo.

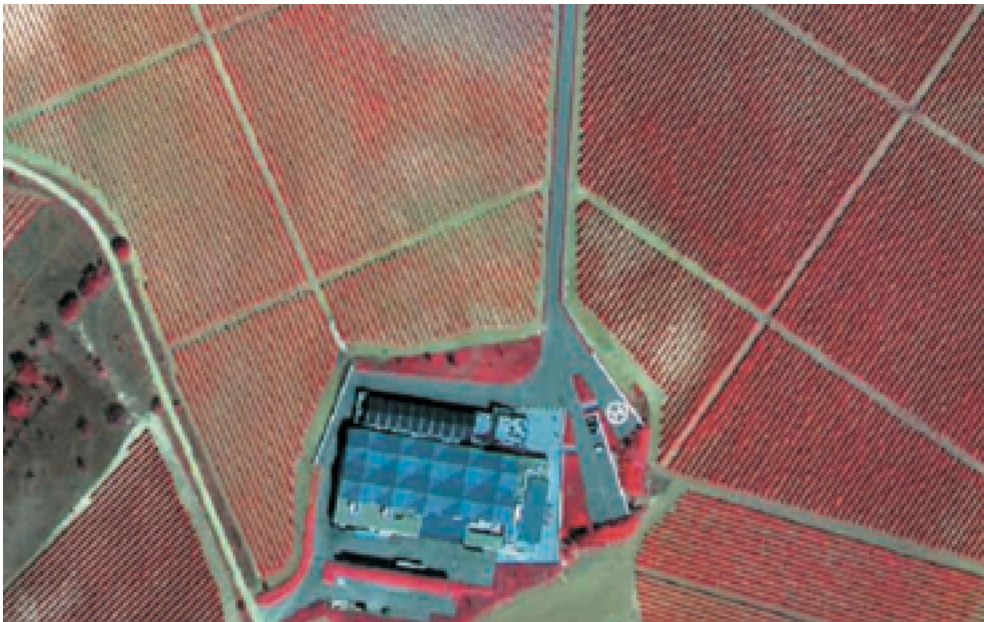


Fig. 5.9 Imagen multiespectral de una explotación vitícola

Además, tiene otras aplicaciones como:

Uso óptimo de fertilizantes.

La detección del *stress* nutricional en los cultivos, a partir de sensores multiespectrales que estiman el desarrollo vegetativo, permite la aplicación de fertilizantes sólo en las zonas necesarias.

Detección temprana de enfermedades y plagas en cultivos.

La capacidad de tomar imágenes multiespectrales en cualquier momento, nos permite detectar los cambios que se están produciendo en los cultivos. La combinación de estos datos con predicciones climáticas de detalle ayudarán a la detección de enfermedades, causadas especialmente por hongos.

Indicadores de calidad en cultivos.

Las imágenes multiespectrales obtenidas desde un UAV permiten, en el marco de un Sistema de Información Geográfica, obtener indicadores de calidad o producción de los cultivos.

Peritación de cultivos.

Cada vez más, la peritación de cultivos ante un siniestro se apoya en imágenes multiespectrales obtenidas a partir de UAVs.

La posibilidad de volar sobre la parcela afectada y obtener imágenes multiespectrales de la finca puede ser una herramienta objetiva en los procesos de peritación.

5.1.6. Aplicaciones al mantenimiento de obras o estructuras como líneas eléctricas o aerogeneradores. Imagen visual y termografía

Actualmente, en el campo de mantenimiento preventivo, los drones son muy útiles para estructuras como redes eléctricas, obras o aerogeneradores, pudiendo expandirse en el futuro hasta incluso reparar alguna anomalía in situ, o participar en procesos de construcción.

Las inspecciones de redes eléctricas y aerogeneradores se realizan mediante un UAV que recorren las líneas y va grabando imágenes visuales y termográficas de las mismas.

Las imágenes visuales sirven para detectar defectos o anomalías en los elementos (apoyos, aisladores, conectores, balizas, etc.). Por otro lado las imágenes termográficas se utilizan para buscar puntos denominados calientes, cuya temperatura es mayor, que puede estar asociado a un contacto inadecuado u otro tipo de defecto que hay que analizar y no es perceptible en el espectro visible.

El uso del UAV permite tomar las imágenes desde un punto de vista diferente al del terreno y normalmente más cercano al elemento, así como desplazarse de manera rápida continua y con una autonomía razonable.

La figura 5.10 muestra un punto caliente en una línea eléctrica en el espectro infrarrojo (donde se aprecia) y visual, donde pasa totalmente desapercibido.

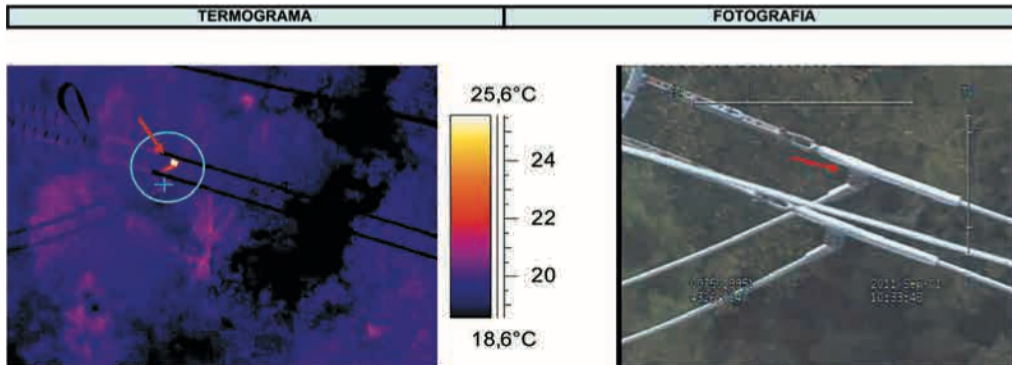


Fig. 5.10 Vista en el espectro infrarrojo de un punto caliente

La inclusión de los Drones en la obra, permite hacer de forma sistemática, precisa, rápida y económica seguimiento de las obras.

La variedad de aplicaciones se amplía cuando se trabaja con otros sensores como cámaras RGB, multispectrales, térmicas, sensores medioambientales o LIDAR.

Los materiales constructivos pueden sufrir degradaciones y defectos provocados por la interacción con el medio a lo largo de su vida útil. Mediante el juego de filtro de distintas longitudes de onda se pueden llegar a aislar e identificar estos fenómenos que a simple vista difícilmente podríamos identificar con cámaras convencionales.

5.2. Ensayos a realizar en el Laboratorio

En esta sección analizaremos las diferentes tecnologías utilizadas y los ensayos que se podrían realizar en el laboratorio para estas aplicaciones.

5.2.1. Cámaras

El uso de cámaras en UAVs es uno de los tipos de carga útil más comúnmente utilizada, con infinidad de aplicaciones como hemos comentado a lo largo del proyecto: topográficas, cartográficas, de seguridad, inspección, filmación de eventos deportivos, etc.

- **Cámaras visibles:** En el laboratorio se puede calibrar este tipo de tecnologías, para lo cual se propone el siguiente método:

Se dispondrán de diferentes marcadores georeferenciados en el suelo, por lo que se conocerá a priori su posición perfectamente definida en un sistema de coordenadas y se hará volar el UAV para tomar imágenes de la superficie. Se dispondrá también de unos marcadores colocados a diferentes alturas en la pared del laboratorio para obtener diferentes tomas de datos y así calibrar a la perfección la cámara corrigiendo defectos de enfoque, objetivo o erratas geométricas.

- **Cámaras infrarrojas:** Para la calibración de este tipo de cámaras se propone el siguiente método:

Se dispondrá de varios focos que emitan a diferentes temperaturas conocidas previamente, y al igual que en el método propuesto para cámaras visibles, se volará el UAV a diferentes alturas capturando los infrarrojos para computar y corregir el error cometido.

- **Cámaras multiespectrales:** Las cámaras multiespectrales son una síntesis de las dos tecnologías anteriores, por tanto se realizarán los métodos de cámaras visibles e infrarrojas para la calibración.

Además, se podrá investigar con cualquier otro tipo de cámaras o tecnologías emergentes, por ejemplo realizar ensayos en penumbra con cámaras de visión nocturna para calibrar perfectamente y observar los métodos a implementar para un buen rendimiento antes de realizar una misión real.

5.2.2. Sensores electrónicos de medida de la concentración de gases

Como hemos comentado anteriormente, este tipo de sensores están basados en una membrana porosa que permite al gas difundirse en el interior de su celda.

Para realizar tests con este tipo de tecnologías y comprobar que funciona a la perfección se propone el siguiente método:

Se emitirán cantidades controladas de gases contaminantes mediante dispensadores, que al entrar en contacto con el electrodo sensible del sensor, creará una corriente eléctrica entre el ánodo y el cátodo que hace variar la diferencia de potencial entre ambos. Conociendo esta variación de la señal

eléctrica, se obtendrá una lectura del nivel de concentración de gas presente, la cual será comparada con la cantidad real emitida por el dispensador para computar y corregir el error cometido por el sensor.

5.2.3. Otros ensayos

Se pueden realizar infinidad de ensayos y estos dependen de la evolución de las tecnologías aplicadas en drones, jugando un importante papel para las tecnologías en vías de desarrollo que nunca han sido probadas o que a priori no se conoce el comportamiento que tienen, pudiendo ser probadas y ajustadas en el laboratorio antes de en una misión real, como por ejemplo el vuelo en ambientes extremadamente peligrosos donde puede haber explosiones.

A continuación se proponen dos métodos de tecnologías emergentes aplicadas a los drones, el primero asociado a la agricultura, que pretende testear la cantidad de nutrientes, agua o insecticidas vertidas por el dron en una determinada zona del cultivo. El segundo método consiste en testear el buen funcionamiento del sistema del proyecto Aquila, un sistema basado en drones para crear una red Wi-Fi en zonas que carecen de las condiciones para instaurar una red de telecomunicaciones convencional.

5.2.3.1. Dispensación de nutrientes o insecticidas para agricultura

Con un buen conocimiento del terreno, realizado mediante cámaras multiespectrales se puede conocer a priori la cantidad de nutrientes, agua o insecticida que necesita cada sector de la explotación con el fin de optimizar al máximo y obtener los mejores resultados en el cultivo.

Para calibrar este sistema de dispensación en el UAV se propone el siguiente experimento:

Se dispondrá de una superficie lo suficientemente grande para no cometer errores susceptibles al proceso de escala, con una malla, bajo la cual se acumulará el producto dispensado por el dron, y se medirá la cantidad exacta de producto, comparándola con la que idealmente debería de haber para así calibrar el sensor que regula este proceso en la aeronave.

5.2.3.2. Red Wi-Fi basada en el uso de drones

Por último, con objeto de proponer una tecnología en desarrollo y de actualidad, se presenta una aplicación que muestra el increíble potencial que tienen los UAVs para uso civil y el amplio abanico de posibilidades que ofrecen, del cual a día de hoy sólo vemos la punta del iceberg.

Dos terceras partes de la población mundial vive en zonas donde no hay instalaciones de telecomunicaciones que permitan la comunicación de datos, por tanto no existe uno de los recursos indispensables para el primer mundo, Internet. Por ello, empresas como Google o Facebook pretenden invertir en el desarrollo de una red Wi-Fi en las alturas, basada en el uso de UAVs, evitando las trabas de la geografía, concretamente desde la estratosfera evitando el tráfico aéreo y las condiciones climatológicas adversas.

El funcionamiento del proyecto se basa en una red de drones interconectados que mediante la tecnología láser transmiten a unos receptores terrestres, proporcionando servicio de datos desde las alturas. Dicha tecnología está en vías de desarrollo pero todo apunta a que será viable para abastecer y globalizar el Internet en el planeta.

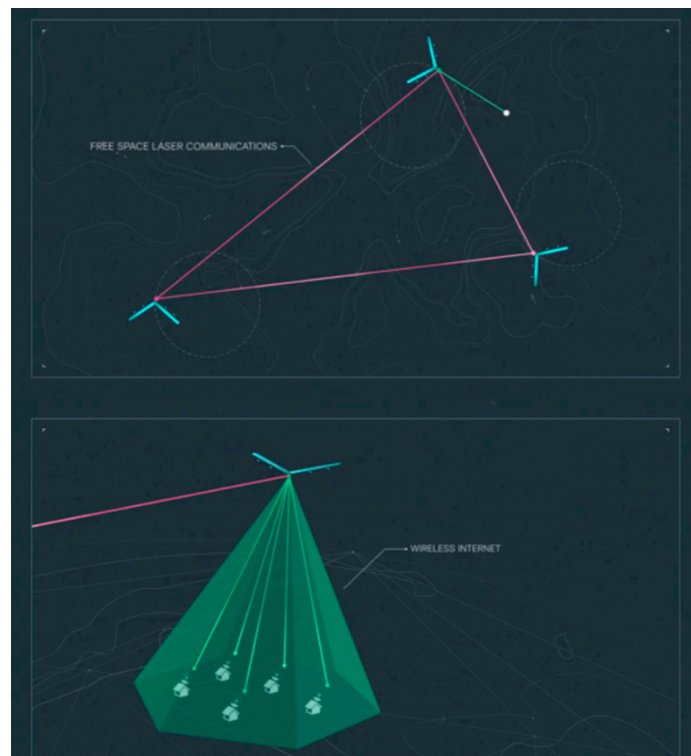


Fig. 5.11 Esquema de funcionamiento del sistema

Es crucial realizar pruebas en el laboratorio para nuevas aplicaciones, y así conocer las prestaciones del sistema a priori, tarea que está realizando en la actualidad la alianza entre Facebook y Google:

Láser: Simular las condiciones reales de la tecnología láser a pequeña escala, ya que en la realidad la distancia entre el emisor y el receptor es desmesurada, y estudiar la viabilidad del proyecto. Este paso ha sido realizado por la empresa, para corroborar la posibilidad de que la red sea instaurada en la estratosfera y aseguran que según las pruebas de laboratorio, esta

comunicación vía láser ofrece velocidades de 10 Gb/s a objetivos situados a 10 kilómetros de distancia, con un radio de cobertura de 80.000 km.

Repetidor Wi Fi: una vez el láser ha alcanzado su objetivo, es tarea de los repetidores distribuir la señal en el espacio, donde podremos realizar medidas de la conexión a diferentes radios y ver cual es la distancia máxima admisible entre repetidores adyacentes, para así saber el número del que hay que disponer para cubrir un cierto área con buenas prestaciones.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Debido a la situación actual, regida por la legislación española que limita en gran medida el uso de RPAS, y a la constante evolución de este sector, se concluye que es necesaria una infraestructura cerrada donde poder realizar tests, investigaciones, tomar datos, calibraciones o simulaciones para prever el comportamiento del UAV ante fenómenos adversos, sin tener que desplazarse fuera del campus del Baix Llobregat.

Se ha establecido un emplazamiento, descrito en el capítulo 2, óptima debido a la superficie disponible y al entorno formado por centros universitarios tecnológicos y empresas del sector.

En este proyecto se han descrito los diferentes tipos de ensayos a realizar en el laboratorio con o sin perturbaciones y la tecnología necesaria para ello, resumidos a continuación:

Para la generación de perturbaciones climatológicas, hemos empleado dos métodos:

- Viento: ventilador industrial con regulador de intensidad y diferentes direcciones de aire.
- Lluvia: aspersores giratorios colocados en la parte superior del laboratorio.

En cuanto a los ensayos, los hemos dividido en tres bloques:

1. Ensayos aerodinámicos

Magnitud	Herramienta
Estabilidad y precisión de la trayectoria	No invasivos: sistema de posicionamiento basado en cámaras y sistema giroestabilizado.
Posición, altitud y ángulos de la aeronave	Invasivos: acelerómetro, giróscopo, magnetómetro y barómetro
Velocidad	Invasivos: sensor de velocidad

Tabla 5 Magnitudes y herramientas para realizar los ensayos aerodinámicos

Además de, se podrían estudiar infinidad de parámetros físicos como proximidad (basado en un LED infrarrojo y un receptor IR), temperatura, intensidad, etc.

2. Ensayos de control y guiado

En el laboratorio, se propone la utilización de un generador que inhiba la recepción de las señales GPS y de radiocontrol para observar el comportamiento y evolución del dron ante la pérdida de estas señales y poder comprobar el funcionamiento de los mecanismos de seguridad y de aterrizaje seguro o de retorno al punto de partida, para evitar inconvenientes como daños en la estructura de la aeronave y en su carga útil.

Perturbaciones	Herramienta
GPS	Inhibidor
Control	Inhibidor

Tabla 6 Perturbaciones y herramientas para realizar los ensayos de control y guiado

3. Ensayos de carga útil

Se han propuesto ensayos para calibrar los diferentes tipos de carga útil como cámaras visibles, infrarrojas y multiespectrales, sensores electrónicos de medida de la concentración de gases o dispensación de nutrientes e insecticidas en agricultura, llegando a la conclusión de que en el ámbito de aplicaciones civiles los drones son una herramienta con un increíble potencial del cual a día de hoy sólo vemos la punta del iceberg.

Si se apuesta por el desarrollo de estas tecnologías y se regula su uso en el espacio aéreo con una normativa específica que no sea totalmente restrictiva, a buen seguro el día de mañana no sólo veremos aviones convencionales surcando nuestros cielos.

BIBLIOGRAFÍA

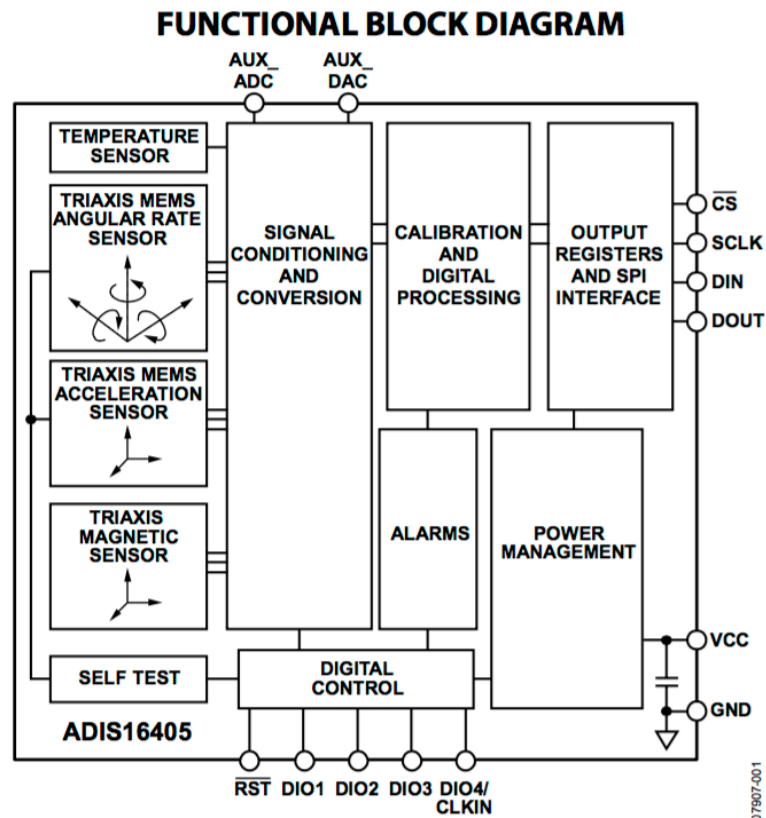
- [1] Valavanis K.P. *Advances in Unmanned Aerial Vehicles, State of the art and the road to autonomy*, S.G. Tzafestas, Tampa (2007)
- [2] Paul Gerin Fahlstrom and Thomas James Gleason *Introduction to UAV Systems* ,WILEY, (2012)
- [3] Nancy J.Cooke, Leah J. Rowe, Winston Bennett, *Remotely Piloted Aircraft Systems: A Human Systems Integration Perspective*, WILEY, (2015)
- [4] University of Minnesota: UAV Laboratories (online)
<http://www.uav.aem.umn.edu/wiki/Infrastructure/FlightControlSystem>
- [5] Analog Devices products (online)
<http://www.analog.com/en/products/sensors/inertial-measurement-units/adis16405.html#product-overview>
- [6] Analog Microelectronics products (online)
http://www.amsys.info/sheets/amsys.en.ams5812_e.pdf
- [7] Centro de Tecnologías Aeroespaciales (CATEC), Aviónica y sistemas no tripulados (online)
<http://www.catec.aero/content/avi-nica-y-sistemas-no-tripulados.htm>

ANEXOS

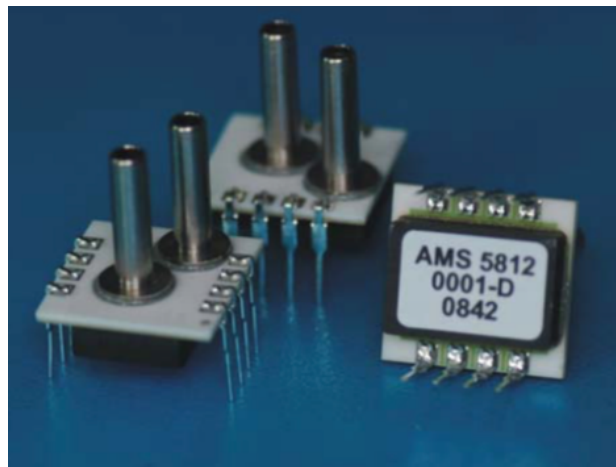
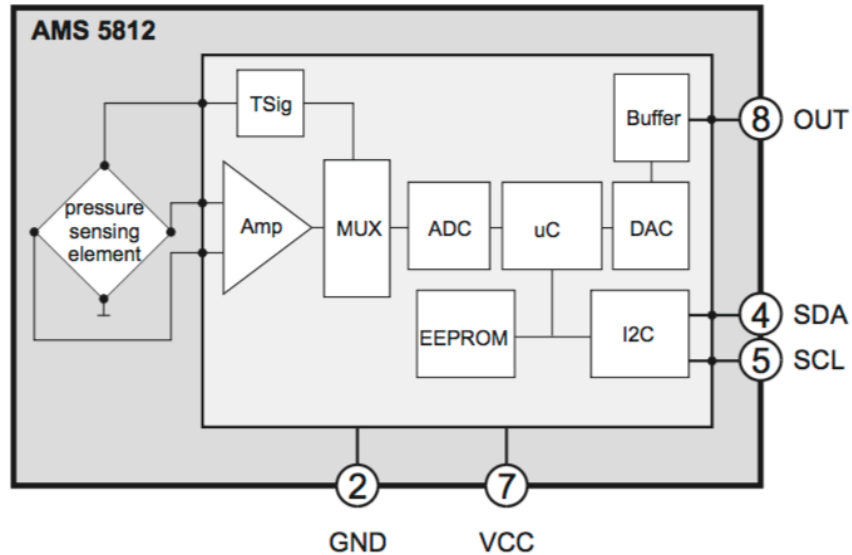
Anexo 1: Propuesta de lista de equipamiento tecnológico del laboratorio

Potenciómetro, giróscopo y magnetómetro triaxiales.

Modelo ADIS16405 de Analog Devices



Sensor de presión AMS 5812 de Analog microelectronics



Además de los sensores para conocer parámetros aerodinámicos de la aeronave, se pueden incorporar multitud de tipos de sensores, según lo que interese medir en el drone, pudiendo por ejemplo calibrar sus componentes o detectar y solucionar problema que tenga. Por ejemplo sensores de proximidad, temperatura para analizar los componentes internos, intensidad o velocidad.

Aspersores para simulación de lluvia

Aspersor oscilante GARDENA para simular lluvia con un alcance de 6,5 m en el eje horizontal.



Simulación de viento

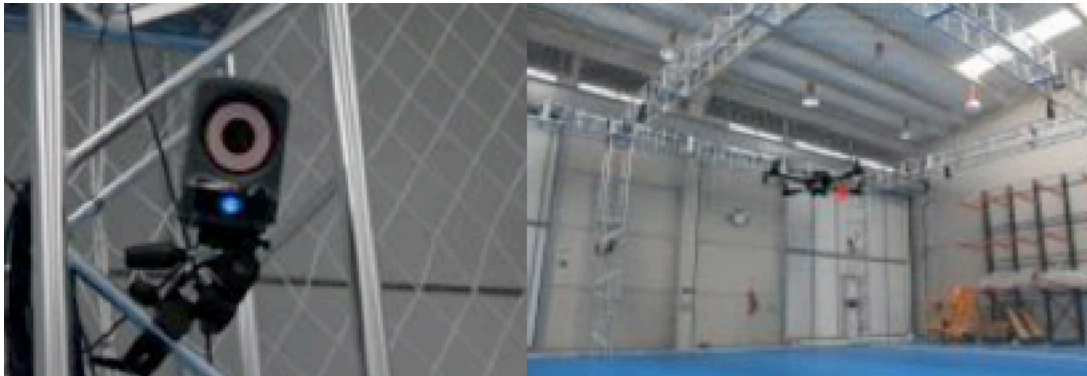
Ventilador industrial TFW 100 de TROTEC

Ofrece una velocidad de salida de aire de 61.2 Km/h, suficiente para simular condiciones de viento durante el vuelo de un UAV.



Sistema de posicionamiento basado en cámaras VICON similar al empleado en CATEC (Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales)

El sistema cuenta con 20 cámaras VICON y puede calcular en tiempo real con hasta 500Hz de tasa de refresco, la posición y la actitud de cualquier objeto móvil que se encuentre en un volumen de 15x15x5m.



Sistema giroestabilizado Gimbal modelo 300 Triple del fabricante SWESYSTEM

El sistema consta de cuatro ejes (dos para apuntamiento y dos para estabilización) y está compuesto por una cámara visual, una cámara termográfica y un láser para medir la distancia al punto que se está observando. La cámara termográfica es el modelo SC620 de FLIR con una resolución de 640x480 píxeles y filtros para altas temperaturas (hasta 1500 °C).



Anexo 2: Estudio de la tecnología FPV en UAVs

El presente anexo es un estudio de la tecnología FPV empleada en carreras de drones, realizado debido a que es un tema que personalmente me interesa mucho, siendo la alternativa de ocio al laboratorio de drones: un espacio donde se puedan realizar carreras con video en primera persona.

A semejanza de las carreras de motociclismo o F1, hoy en día existe el objetivo de hacer de los drones de carreras un gran espectáculo. Para ello hay que diseñar una tecnología en primera persona para que el piloto guíe correctamente la aeronave y retransmitir la imagen que ven los pilotos a los espectadores con buena calidad.

Para el FPV (First Person View) en las carreras se usa actualmente un sistema de imagen analógico (existen equipos FPV en 900MHz, 1.3GHz, 2.4GHz y 5.8GHz). Aunque ya han empezado a salir los primeros sistemas digitales el problema es que son demasiado grandes, pesados y tienen retardo (bastante más de 100ms), inviable para un control en tiempo real del drone.

En Europa existen una serie de restricciones de potencia y bandas vetadas así que hoy en día casi todos los pilotos de drones de carreras usan una señal FPV en 5.8GHz por motivos de peso, tamaño reducido de componentes y compatibilidad total con las emisoras RC de 2.4GHz sin añadir filtros. El problema en 5.8GHz es de interferencias, y la imagen ha de ser imagen HD.

Si se quiere llevar las carreras al gran publico y atraer inversores hay que mejorarlo. Mínimo se necesitará una imagen en calidad HD sin interferencias y un sistema de postproducción para hacerlo un gran espectáculo.

Por ello se han estipulado unos requisitos mínimos que habrá de tener el sistema y el circuito.

Requisitos del sistema:

Alcance: 150-200 m
Altura vuelo: 1-5 m
Sistema FPV HD 1080p 60fps
Atravesar obstáculos sin interferencias
Retardo máximo cámara -gafas FPV del piloto 100ms
Retardo máximo público (pantallas/gafas) inferior a 1 seg
Transmisor de tamaño y peso reducido
Sistema OSD para introducir banderas amarillas y otros gráficos en la imagen de los pilotos.

Circuito/medidas de seguridad

Grandes espacios para carreras: Edificio autónomo
Medidas de seguridad: redes para evitar que un dron salga disparado contra pilotos / publico o suba a demasiada altura.
Trazado de circuito bien diseñado
Zona pilotos
Zona público con gradas
Zona pantallas gigantes
Sistema de cronometraje y transponders para controlar el paso por puertas y poder dar medias y estadísticas.

Por motivos de seguridad, sería interesante además de localizar estos obstáculos, poder evitarlos, una especie de sistema similar al "collision avoidance" de las aeronaves convencionales.

Intel, ha desarrollado un sistema que detecta posibles colisiones y las evita, la llamada tecnología Real Sense. Esta tecnología está basada en cámaras 3D que detectan obstáculos y los comunican al CPU del dron para evitar colisionar. La tecnología ha sido probada con 100 UAVs equipados con un led

para su visibilidad a poca luz, volando simultáneamente sin generar ningún tipo de problemas de colisión o interferencias.

Para que el sistema funcione correctamente, se necesitan una serie de elementos que empiezan por las cámaras, siendo las responsables de capturar en tiempo real los espacios físicos para poder interactuar con ellos, equipadas de sensores capaces de trabajar en conjunto para unir imágenes en tiempo real, al mismo tiempo que almacenan la información.

Las cámaras se dividen en:

Cámara principal encargada de capturar la escena

Cámara RGB que capta la profundidad

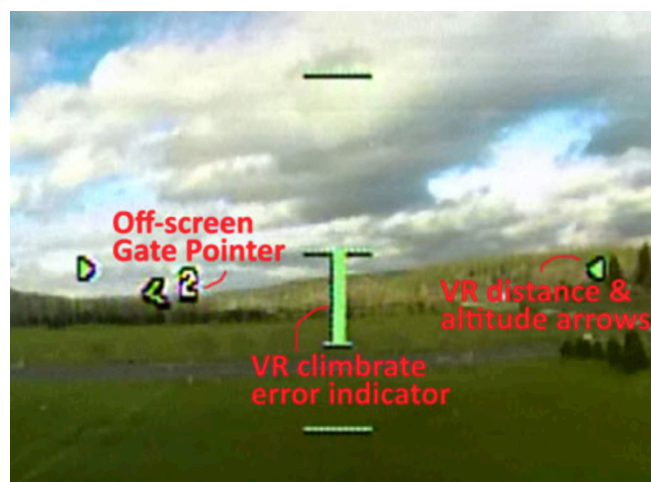
Cámara con lente fisheye que rastrea el movimiento y graba todo lo que se está capturando.

Además, éstas se apoyan en tecnología láser para enfoque y un sensor infrarrojo que mide la distancia con los objetos físicos, de esta manera ofrece una perspectiva 360 grados en un espacio tridimensional, donde cualquier objeto puede ser detectado y evitado.

Además, es interesante la opción de cara al entrenamiento de pilotos de las puertas virtuales, un mecanismo que permite entrenar “sin circuito” de manera virtual.

La empresa Eagle Tree Systems ha desarrollado para su controladora de vuelo Vector con OSD y GPS unas puertas virtuales llamadas SkyGates.

Gracias al GPS y OSD se van dibujando puertas por el cielo que tendremos que ir pasando y existe la opción de cronometrar el tiempo. El mismo OSD va mostrando la dirección donde están las siguientes puertas, mejores vueltas y otra información que puede interesar mientras se realiza el circuito.



El equipo FPV se compone básicamente de:

Cámara

Transmisor de vídeo (video Tx) con una antena
Receptor de vídeo (video Rx) con una antena
Pantalla/gafas para visualizar la imagen

Cámara

Para el equipo FPV usamos cámaras de seguridad CCTV.

Las TVL o líneas de televisión nos ayudarán a clasificar la calidad de imagen entre una cámara y otra. Las TVL hacen referencia al número de líneas horizontales en la pantalla y mientras más alto sea el número de líneas de televisión se captura mayor información y por lo tanto se obtiene una mejor imagen. En Europa usamos el sistema de codificación PAL y en América NTSC.

2. Transmisor de vídeo (Video TX)

El transmisor de vídeo se encarga de transmitir inalámbricamente la señal de vídeo que recibe de la cámara.

Las frecuencias usadas para FPV son:

900MHz (más baja) *Ilegal en España
1.3GHz *necesaria licencia de radioaficionado
2.4GHz
5.8GHz (más alta)

Y tienen estas particularidades a igual potencia de emisión:

FRECUENCIAS MÁS BAJAS	FRECUENCIAS MÁS ALTAS
Mayor alcance	Menor alcance
Mayor penetración en obstáculos	Más problemas para penetrar en obstáculos
Antenas más grandes	Antenas más pequeñas
Menor ancho de banda y por lo tanto menor calidad de imagen	Más ancho de banda y mayor calidad de imagen pero siempre con los límites de las retransmisiones analógicas

Cada frecuencia tiene una serie de canales que los fabricantes han fijado. Hay emisores que pueden transmitir en más canales sobre una misma frecuencia que otros. Por ejemplo, en 5.8GHz hay transmisores de 32 canales. Esto nos permite correr más gente a la vez en el mismo rango de frecuencia pero en distintos canales sin que se solape la señal de vídeo.

Las gran mayoría de emisoras funcionan actualmente en 2.4GHz. Para poder pilotar el dron de carreras y no tener problemas de interferencias con la

emisora de radio y perder el control del multicoptero, la frecuencia de radio debería ser siempre inferior a la frecuencia de vídeo. Así, si se crean interferencias, estas afectarán al video y no a la radio.

Si queremos usar frecuencias de video más bajas (900GHz / 1,3GHz) o iguales (2,4GHz) al de la radio, lo mejor es bajar también la frecuencia de radio con un sistema LRS (Long Range System) pero esto es un desembolso adicional. Otra opción es poner un filtro pasa bajo o un filtro notch en el transmisor de video para quitar los armónicos que crean las interferencias con nuestro sistema de radio.

Por lo tanto, si usamos la emisora de radio en 2.4GHz y no queremos rompernos la cabeza con filtros y más cosas, lo mejor es usar el video en 5.8GHz. Queremos correr contra otros drones en un circuito y seguramente no nos iremos a mucha distancia. Las antenas son más pequeñas y ligeras para nuestros mini multirrotores y las gafas vienen en su mayoría con módulos de 5.8GHz aunque existen módulos de diferentes frecuencias también. En general el equipo FPV es de menores dimensiones en 5.8GHz.

Potencia de emisión (mw): Sin entrar a valorar las antenas y sus ganancias, mientras mayor sea la potencia de emisión más lejos podremos ir con nuestros multicopteros en vista directa entre antenas sin perder la señal. Como con los drones de carreras no nos interesa hacer distancias largas aconsejamos usar una potencia de emisión de máximo 600 mw aunque si nos ceñimos a la legalidad deberíamos usar 25mw. A más potencia de emisión más grandes son los transmisores, más consumen y más se calientan.

Por tanto, lo ideal es disponer de frecuencia 5.8GHz con una potencia de emisión entre 200mw y 600mw y a poder ser de 32 canales.

3.Receptor de vídeo (video RX)

El receptor de vídeo se encarga de recibir inalámbricamente la señal de video que envía el transmisor.

Igual que los transmisores, estos funcionan en diferentes frecuencias.

900MHz (más baja) **Illegal en España*

1.3GHz **necesaria licencia de radioaficionado*

2.4GHz

5.8GHz (más alta)

Nos vamos a centrar en la frecuencia de 5.8GHz por las razones que explicamos anteriormente.

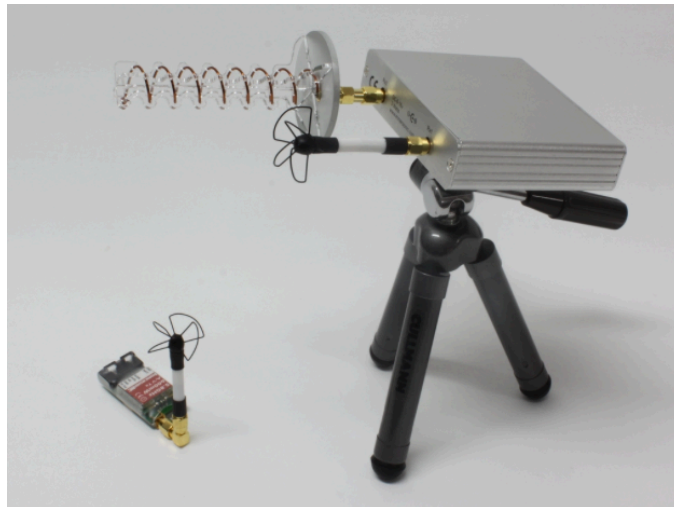
Si tenemos un transmisor en 5.8GHz necesitamos un receptor en la misma frecuencia de 5.8GHz y que reciba en los mismos canales que emite el transmisor. En la siguiente imagen podéis ver las frecuencias de los 32 canales en 5.8GHz.

Mientras más canales disponibles tengamos, más gente a la vez podrá correr en la misma frecuencia. Pero que tengamos 32 no significa que puedan correr

32 pilotos al mismo tiempo. Hay que dejar margen entre canales para que no haya interferencias entre los pilotos. Para empezar, nosotros haríamos mangas de 6 pilotos como máximo a la vez dejando suficientes canales libres y poco a poco ir incorporando más si todo va bien.

Receptor de vídeo diversity

Estos receptores llevan dos antenas. Mejoran mucho la calidad de la señal de video ya que el receptor elige siempre la antena con la que recibe mejor la señal. Podemos conseguir distancia y omnidireccionalidad combinando antenas como podemos ver en la imagen a continuación. El problema suele ser el precio.



Receptor diversity con antenas de polarización circular direccional y omnidireccional

Antenas

Las antenas están hechas específicamente para cada frecuencia, no siendo aconsejable mezclar por ejemplo antenas de 2.4GHz con equipos de 5.8GHz.

Las antenas que vienen de serie (antenas whip omnidireccionales de polarización lineal) con los transmisores y receptores podríamos decir que son muy malas para la frecuencia de 5.8GHz ya que crean interferencias de video multi-path y hacen que la calidad de vídeo sea mala.

Si queremos exprimir la señal necesitaremos cambiar las antenas.

Esencialmente hay 4 grupos de antenas:

Antena de polarización lineal omnidireccional (las que vienen de serie con los transmisores y receptores)

Antena de polarización lineal direccional

Antena de polarización circular omnidireccional

Antena de polarización circular direccional

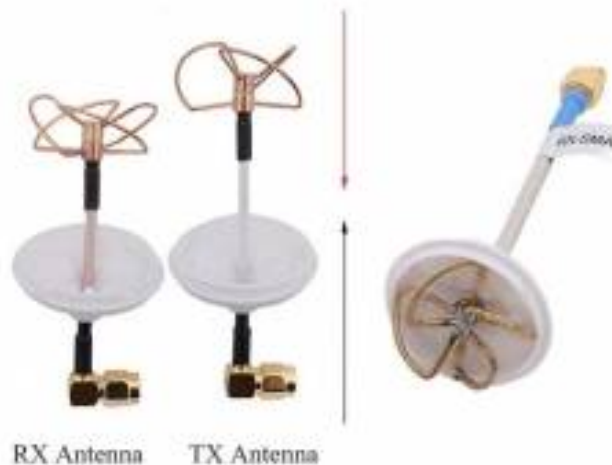
Como ya hemos explicado, por culpa de las interferencias multipath en 5.8GHz, vamos a centrarnos en las antenas de polarización circular ya que

son las más adecuadas para el tipo de vuelo de cercanía que se realiza en las carreras de drones.

La polarización circular de las antenas puede ser hacia la derecha (RHCP) o hacia la izquierda (LHCP). Importante asegurarse de usar siempre la misma dirección de polarización en las antenas del transmisor y receptor.

Antena de polarización circular omnidireccional

Estas antenas son las más usadas en 5.8GHz. Hay muchos modelos y variantes con ciertas características que mejoran aún más la recepción o emisión de la señal (cloverleaf, Skew Planar,...).



La ventaja de estas antenas es que podemos movernos en todas direcciones, incluso volar por detrás nuestro y seguiremos recibiendo señal, cosa que con las direccionales no podemos hacer sin la ayuda de un tracker o un receptor diversity, lo que supone un aumento en el coste.

La configuración de antenas que más se usa para el tipo de vuelo que nosotros hacemos. Una antena cloverleaf de 3 lóbulos en el transmisor de vídeo y una antena Skew Planar de 4 lóbulos en el receptor de vídeo.

Antena de polarización circular direccional

Estas antenas tienen la particularidad de aumentar mucho la distancia a la que podemos volar pero solo en un ángulo determinado.



Siempre se ponen en el receptor. Mientras nos mantengamos en el ángulo de cobertura de estas antenas la señal será mejor y tendremos menos cortes que con las anteriores. No las aconsejamos ya que tendremos que tener en cuenta donde volamos y donde situamos la antena, así que no entraremos en más detalle.

Si usásemos un tracker de antena podríamos usar las ventajas de una antena direccional haciéndola omnidireccional. Un tracker es un sistema que permite mantener una antena direccional continuamente apuntando hacia nuestro multirrotor / avión / dron. El inconveniente es que necesitaremos más dinero, es más aparatoso y necesitaremos más conocimientos para hacerlo funcionar.



Para hacer un símil fácil de entender... Si una antena direccional fuese una linterna o foco que emite luz en una sola dirección a gran distancia, una antena omnidireccional sería como una bombilla emitiendo luz en todas direcciones y con un alcance menor

Gafas o monitores

Para poder visualizar la señal de video que nos da el receptor necesitamos un dispositivo de visualización como pueden ser unas gafas o un monitor.

Hay personas que prefieren volar con gafas y hay otras que prefieren volar con un monitor así que es cuestión de gustos.

Pantallas

Podemos usar cualquier pantalla analógica con entrada RCA de vídeo compuesto pero tenemos que tener cuidado de seleccionar un monitor sin pantalla azul. Si tiene pantalla azul no lo podremos usar ya que si estamos volando y por cualquier razón cae la intensidad de la señal de video aparecerá la pantalla azul y no veremos nada durante unos segundos.

Para evitar este problema han salido pantallas específicas para FPV como esta que ponemos a continuación.



Pantalla para FPV

Además, cada vez salen más pantallas al mercado con el receptor de vídeo diversity incorporado.



Gafas



Casi todas las gafas disponen de un receptor incorporado o se puede incorporar uno para hacer el equipo FPV lo más pequeño posible. Pero la mayoría también tiene entrada de vídeo por si queremos usar un receptor externo.

Algunos factores a tener en cuenta al comprar unas gafas:

FOV (campo de visión): Mientras más grande sea el FOV de las gafas, mayor será el tamaño de la imagen a través de las gafas. No aconsejamos gastar el dinero en unas gafas con un FOV menor a 25°.

Resolución: A mayor resolución, más calidad apreciaremos en la imagen (con las limitaciones del sistema FPV)

